

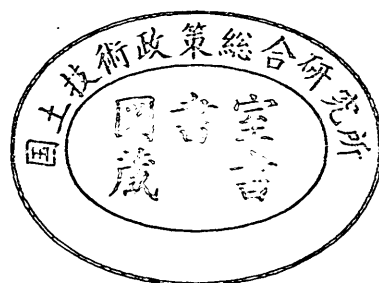
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 22 NO. 2 JUNE 1983

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第22巻 第2号 (Vol. 22, No. 2), 1983年6月 (June 1983)

目 次 (CONTENTS)

1. 大河川河口部周辺の移動床模型実験
——吉野川河口周辺地形変化について——
……………加藤 一正・田中則男・木村久雄・赤石正廣………… 3
(Movable-bed Model Experiments of a Large River-mouth and its Surroundings
—On Deformation of Topography at the Yoshino River—
……Kazumasa KATO, Norio TANAKA, Hisao KIMURA and Masahiro AKAISHI)
2. 多量データを対象とした等値線自動描画アルゴリズムの開発
……………橋本典明・高橋智晴………… 89
(A New Method for Automatic Contour Mapping Applicable to a Large Number of
Discrete Sampling Data ……Noriaki HASHIMOTO and Tomoharu TAKAHASHI)
3. 吹送流に関する風洞実験
——吹送流の発生に及ぼす反流の効果——
……………鶴谷 広一・中野 晋・加藤 始・一戸秀久………… 127
(Experimental Study of Wind Driven Currents in a Wind-Wave Tank
—Effect of Return Flow on Wind Driven Currents—
…………… Hiroichi TSURUYA, Susumu NAKANO, Hajime KATO
and Hidehisa ICHINOHE)
4. 超音波流速計による潮流観測と水平・鉛直拡散係数の算定
……………村上和男・森川雅行………… 175
(Field Observations of Tidal Current by Ultra-Sonic Current Meter and Estimations
of Horizontal and Vertical Diffusion Coefficients
…………… Kazuo MURAKAMI and Masayuki MORIKAWA)
5. 深層混合処理工法による杭状改良地盤の支持力および圧密特性
……………寺師昌明・田中洋行………… 213
(Bearing Capacity and Consolidation of the Improved Ground by a Group of Treated
Soil Columns ……Masaaki TERASHI and Hiroyuki TANAKA)

6. 老化にともなうアスファルトコンクリートの性状変化
——70°C の熱履歴による促進老化の場合——
.....八谷好高・福手 勤・佐藤勝久..... 267
(Changes of Properties of Asphalt Concretes due to Heat Curing at 70°C
..... Yoshitaka HACHIYA, Tsutomu FUKUTE and Katsuhisa SATO)
7. 大型混成式防波堤の強震記録に基づく水-構造物連成系の地震応答解析
.....上部達生・土田 肇・倉田栄..... 289
(Coupled Hydrodynamic Response Analysis based on Strong Motion Earthquake Records
of Fill Type Breakwater in Deep Sea
..... Tatsuo UWABE, Hajime TSUCHIDA and Eiichi KURATA)
8. 2次元アレーによる地震動の観測と解析 (第1報)
——1977年6月4日東京湾北部の地震——
.....土田 肇・井合 進・倉田栄..... 327
(Analysis of Earthquake Ground Motions Observed with Two Dimensional Seismometer
Array (First Report)
—North Tokyo Bay Earthquake of June 4, 1977—
..... Hajime TSUCHIDA, Susumu IAI and Eiichi KURATA)
9. 集中腐食に対する電気防食の適用性.....善 一章・阿部正美..... 379
(Applicability of Cathodic Protection to Concentrated Corrosion
..... Kazuaki ZEN and Masami ABE)

9. 集中腐食に対する電気防食の適用性

善 一 章*・阿 部 正 美**

要 旨

港湾鋼構造物の海中部の防食に電気防食が一般に適用されている。一方、港湾鋼構造物（無防食）の腐食調査の結果、平均干潮面直下部に腐食が集中して、比較的短期間で鋼構造物は腐食による損傷を受けるケースのあることがわかった。これに対して、集中腐食に対する電気防食の適用についての検討はほとんど行われていない。したがって、港湾鋼構造物にシミュレートした供試体を用いて潮位が定期的に変動する野外実験水槽で、集中腐食に対する電気防食の適用性、防食効果に関する実験を行った。このほか、現地において鋼管杭の電防試験も行った。実験の結果、以下のことがわかった。

- (1) 電気防食の集中腐食に対する防食率は97%以上であった。
- (2) 潮位間の防食電流密度は大きいので、所要防食電流（初期値）の算出には潮位間についても行う必要がある。
- (3) 潮位間の被覆は防食電流の節減に有効である。
- (4) 発錆鋼材に電気防食を適用したとき、さび層の還元電流が必要であった。

* 構造部 主任研究官（防食担当）

** 構造部 材料施工研究室

9. Applicability of Cathodic Protection to Concentrated Corrosion

Kazuaki ZEN*
Masami ABE**

Synopsis

As a result of corrosion survey of steel structures in the marine environments, it has found that in some cases corrosion concentrated at the portion just below M.L.W.L. Since occurrence of the corrosion is dangerous for steel structures, especially, steel pipe pile structures, applicability and effectiveness of cathodic protection to the corrosion were investigated in the field water tank. Besides, a field test of cathodic protection was done by using a steel pipe pile.

Consequently, the following results were obtained:

- (1) Protective efficiency of the protection to the corrosion was more than 97 percents.
- (2) Current density being required to protect steel portion at tidal zone was greater than a typical value of the initial protective current density in sea water 100 mA/m^2 . Accordingly, it is desired that protective current requirement is calculated regarding steel surface at tidal zone too.
- (3) It is effective to cover steel surface at tidal zone for reducing the requirement.
- (4) When applying cathodic protection to existing steel structures, we have to supply extra protective current temporarily for reducing rust layers on steel surface.

* Senior Research Engineer, Structures Division.

** Member of Materials Laboratory, Structures Division.

目 次

要 旨	379
1. ま え が き	383
2. 実 験 方 法	383
2.1 実験の内容	383
2.2 実験水槽	383
2.3 試験片	383
2.4 測定方法	384
3. 実 験 結 果	385
3.1 防食電流の測定	385
3.2 マクロ腐食電流の測定	388
3.3 電位の測定	391
3.4 腐食速度の測定	392
3.5 分極曲線の測定	394
3.6 抵抗の測定	395
3.7 試験片の観察	395
3.8 水質分析及び気象条件	397
4. 考 察	397
4.1 集中腐食に対する電気防食の適用性	397
4.2 所要防食電流	398
5. 結 論	402
参 考 文 献	402
写 真	403
付 図	415
付 表	422

1. ま え が き

港湾鋼構造物の腐食調査結果によれば、海中部の腐食は一様ではなく平均干潮面付近の腐食速度が1 mm/y程度となる著しいケースも発生した¹⁾。このように特定の部位に腐食が集中する場合、比較的短期間で鋼構造物は腐食による損傷を受ける。例えば、矢板式構造物では平均干潮面付近の凸面に穴があき、裏込め土砂の流出及び上部工の陥没となり、また杭式構造物では平均干潮面付近の杭面に穴があき、構造物は使用不能となる。したがって、港湾鋼構造物では集中腐食に対する対策が重要となる。従来、海中部の防食法として一般に電気防食法が適用されているので、電気防食の集中腐食に対する効果を明らかにすることが必要である。そこで、潮位が定期的に変動する野外水槽において港湾鋼構造物にシミュレートした供試体を用いて腐食・防食の実験を行い、電気防食の集中腐食に対する適用性を検討した。このほか、現地の杭を用いて電防試験を行い、野外水槽における実験結果の検討に参考とした。

2. 実験方法

2.1 実験の内容

実験は表-2.1 に示すように実験1と実験2よりなる。実験1は海水条件が潮位変動のみのときのマイクロ腐食試験、マクロ腐食試験及び電防試験(防食電位: -780 mV, 海水塩化銀電極基準)、実験2は海水条件が潮位変動と攪拌のときのマイクロ腐食試験、マクロ腐食試験及び電防試験(防食電位: -900 mV, 海水塩化銀電極基準)である。測定項目は、防食電流、電位、腐食量(重量減量

表-2.1 実験の内容

実験条件	海水 防食電位(mV) [※]	実験 1			実験 2		
		マイクロ片	マクロ片	電防片	マイクロ片	マクロ片	電防片
		潮位変動			潮位変動+攪拌		
				-780			-900
測定項目	防食電流			○			○
	電位	○	○	○	○	○	○
	重量減量	○	○	○	○	○	○
	マクロ腐食電流				○	○	○
	分極試験				○	○	○
	抵抗	○	○	○	○	○	○
	観測				○	○	○
水質試験				○	○	○	
気象データ		○			○		

※: 海水塩化銀電極基準

○: 実施

及びマクロ腐食電流)、分極曲線、抵抗、観察、水質及び気象条件(気温、湿度、風速)である。

2.2 実験水槽

実験水槽はコンクリート製で、そのうちのりは、横2 m、縦4 m、深さ2 mであった。水槽の外壁深さ2 mのうち、1.5 mは地中に埋設してあり、残り、0.5 mが地上に出ているかっこうである。水槽は当研究所の敷地内で岸壁から5 mのところの位置しており、水槽には付属ポンプによって岸壁外の自然海水が定期的に給、排水された。水槽内の潮位変動は図-2.1に示すように、干潮6時間、満潮4時間の変動サイクルで潮位の変動幅は55.5 cmであった。なお、給、排水は約1時間かけて行われたので、攪拌をしなければ給、排水時に水槽内の水面は波立つことはなく、また給水後の満潮時と排水後の干潮時の海水面も攪拌しなければほとんど静止状態であった。実験1では潮位変動のみの条件下で実験が行われ、実験2では水中ポンプを連続運転して潮位変動と海水、流動の条件下で実験が行われた。後者の場合、水中ポンプの使用によって海水面は絶えず約5 cm上下動した。水槽上部は危険防止のためグレーチングで蓋をされたが、強風のときにはグレーチングの隙間から入った風が海水面上の試験片の乾燥に役立った。

2.3 試験片

試験片の寸法は横10 cm、縦8 cm、厚さ1 mmで、材質はSS 41であった。試験片の表面をサンドペーパー # 240 で研磨後トリクロロエチレンで脱脂し、各片の初期重量を測定した。重量を測定した各片の片面に測定用電線を接続し、これらを図-2.2に示すように塩ビ製パネルに接着、固定した。この接着、固定にはアララダイト(二液性)を使用した。なお、接着、固定に先立って試験片裏面に接続した測定用電線をあらかじめパネルに付けてあった穴(φ 16 mm)えとおしてパネル背後

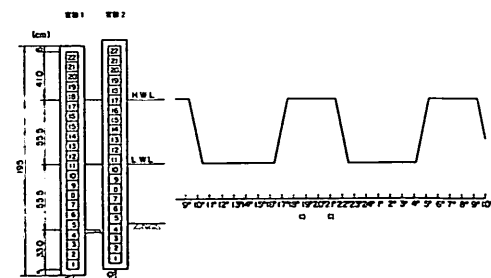


図-2.1 野外水槽における供試体の配置および潮位の変動周期

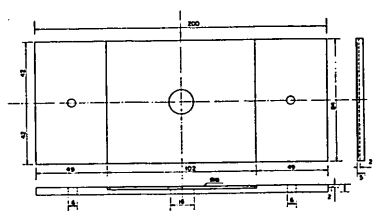


図-2.2 鋼板埋設用フレーム (単位: mm, 材質: 硬質塩化ビニル板)

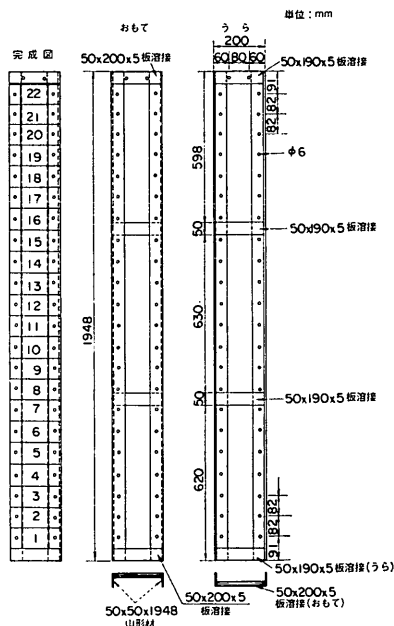


図-2.3 試験用パネル

に引出しておいた。塩ビ製パネル1箇に試験片22枚を接着、固定したが、その状況を図-2.3に示す。図-2.3に示す各試験片の取代間隔は4mmであった。表-2.1に示すように実験1, 2ともそれぞれ3組のパネルを作成し、マイクロ腐食試験, マクロ腐食試験及び電防試験に供した。以下マイクロ腐食試験用パネルはマイクロ試片, マクロ腐食試験用パネルをマクロ試片, 電防試験用パネルを電防試片と呼ぶことにする。マイクロ試片では22枚の鋼材片を開路の状態とし, マクロ試片と電防試片では22枚の鋼材片を短絡した。各試片を図-2.1に示す要領で野外水槽内に配置し, 各試片に接続した測定用電線は水槽から約5m離れた測定室内の測定端子に接続された。

2.4 測定方法

(1) 電流測定

電防用試片は外部電源法で電防された。このとき陽極

には鉛銀電極を使用し, 防食電位をポテンショスタットを用いて実験1では -780 mV (海水塩化銀電極基準)に, 実験2では -900 mV (海水塩化銀電極基準)に保持した。防食電流には, 全電流と No. 1~No. 22 の各試験片に流入する防食電流の2つがあり, どちらも電位降下法 ($1\ \Omega$ の抵抗挿入) で測定された。測定には電位自記記録計を使用した。マクロ試片については, 試験片 No. 1~No. 22 に流出する電流を電圧降下法 ($1\ \Omega$ 抵抗挿入) によって測定した。測定には電位自記記録計を使用した。

(2) 電位測定

海水塩化銀電極を基準電極として高抵抗電位差計, 又はデジタル式電位差計を用いて, 試片の電極電位を測定した。

(3) 抵抗測定

マイクロ試片, マクロ試片及び電防試片について, 試験片 No. 10 と各試験片間の抵抗又は表面積 2000 cm^2 のステンレス板と各試験片間の抵抗をデジタル式抵抗計で測定した。

(4) 分極曲線測定

定電位試験器 (北斗電工製 PS-1000) を用いて定電位分極曲線をマイクロ試片について自動式 (50 mV/min , 10 mV/min) で求めた。

(5) 腐食量測定

重量減量を求め, (1)式から腐食速度を算出した。

$$\text{腐食速度} = \frac{\Delta W \times 10}{A \times d \times t} \quad (\text{mm/y}) \quad \dots\dots(1)$$

ΔW : 重量減量 (g)

A : 表面積 (cm^2) = 80 cm^2

d : 鋼材の密度, $7.86\text{ (g/cm}^3\text{)}$

t : 腐食期間 (y)

また, 重量測定値を (2) に代入して電気防食の防食率を算出した。

$$\text{防食率} = \frac{\Delta W_0 - \Delta W_p}{\Delta W_0} \times 100 \quad (\%) \quad \dots\dots(2)$$

ΔW_0 : 無防食時の重量減量 (g)

ΔW_p : 電防時の重量減量 (g)

(6) 観察

回収後, マイクロ試片, マクロ試片及び電防試片の表面を脱錆前と脱錆後に観察 (写真撮影) した。

(7) 水質

海水の水質分析を JIS K-0102 (工場排水の分析) の方法に準拠して行った。分析項目は比重, pH, 濁度,

Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, CO₃ であった。

(8) 気象観測データ

当所の海岸近くで観測されている気象観測データ（当所水工部が実施）（気温、湿度、風速）を利用した。このほか、晴雨の区別を記録した。

3. 実験結果

3.1 防食電流の測定

(1) 実験1（電防試片，防食電位：-780 mV）

防食電位 -780 mV のときに，防食試片（No. 1～No. 22）に流入した防食全電流と各片の防食電流の経時変化を測定した。図-3.1.1 に潮位変動による防食全電流の変化例を示す。図に示すように，防食全電流は干潮から満潮にかけて増加した。防食全電流は，満潮初期に最大（①）となり，経時とともに減少して一定値（②）となった。満潮後，排水し始めると防食全電流は更に減少し，干潮状態で一定値（③→④）となった。防食全電流の経日変化を便宜上上記①，②，④の値について示すと，図-3.1.2（満潮が6時），図-3.1.3（満潮が18時）のとおりである。両図に示すように，防食全電流は経日とともに低減して一定値に近づいた。①，②，④の中で①（満潮初期）の値の低減が最も著しく，約100日後の電流値は初期値（30～40 mA）の数分の1（7～10mA）になった。②，④では，約100日後の電流値は初期値（②：約10 mA，④：約5 mA）の約半分に減少した。

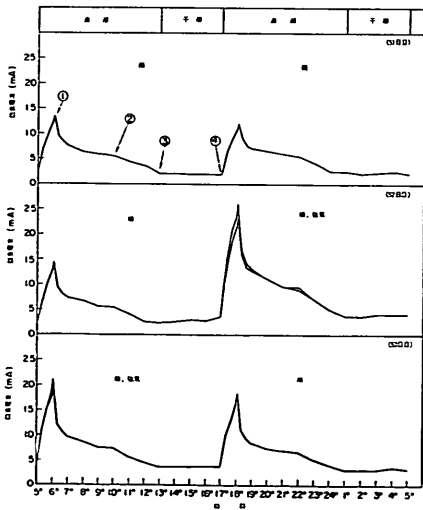


図-3.1.1 防食全電流の経時変化（51日目～53日目）（実験1）

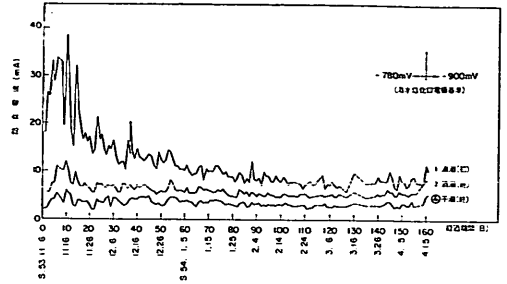


図-3.1.2 防食全電流の経日変化（実験1）
（満潮（初）：午前6時）

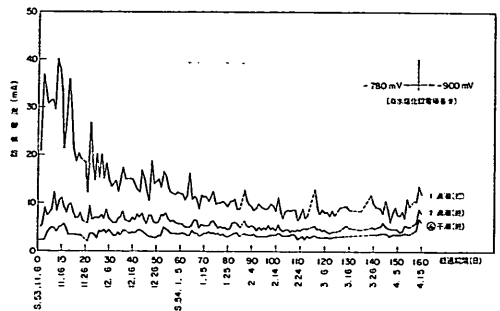


図-3.1.3 防食全電流の経日変化（実験1）
（満潮（初）：午後6時）

満潮開始時間のずれの防食全電流への影響は，主として満潮初期（①）でみられた。図-3.1.2，3.1.3 で比較すると，午後の満潮時の値の方が午前の満潮時 図-3.1.2 の値より若干大きかった。同じ傾向は，図-3.1.1 の52日目（晴天）でもみられた。防食全電流の値は測定日によって異なっており，この傾向は満潮初期の値で著しい。付図-3.8.1，3.8.4 に示す気象データと図-3.1.2，3.1.3 を照合してみると，満潮初期の防食全電流は，雨天の日に減少し晴天の日に増加した。図-3.1.1 では，防食全電流は晴天・強風>晴天>雨天の順に大きかった。次に，防食全電流を初期（10日目），中期（100日目），終期（155日目）（何れも晴天）で比較すると 図-3.1.4 のとおりである。満潮初期の値（①）は，10日目で36 mA程度，100日目と155日目で7～8 mA，干潮時の値（③～④）は，10日目で5 mA程度，100日目と155日目で3 mA程度であった。159日目～160日目に防食電位を -780 mV から -900 mV に切換えたところ，防食全電流は40～50%増加した。しかし，-900 mV のときの電流値はこれから徐々に低減していくものであるから，増加した値は一つの参考値である。

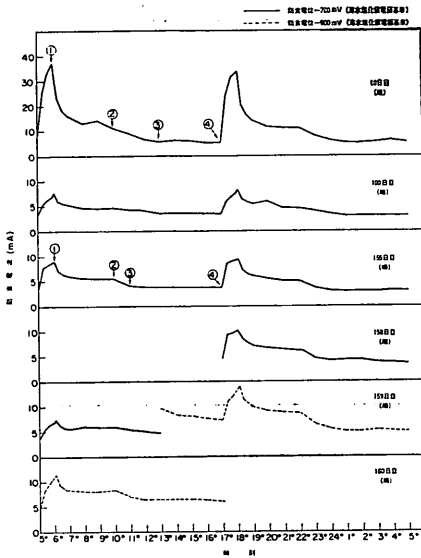


図-3.1.4 防食全電流の経日変化(実験1)
 (①: 満潮(初) ②: 満潮(終))
 (③: 干潮(初) ④: 干潮(終))

潮位間の試片(No. 12~No. 18)に流入した防食電流の経時変化例を付図-3.1.1~3.1.3に示す。潮位間、海水中、海泥中の試片に流入した防食電流の経時変化例を付図-3.1.4~3.1.6に示す。潮位間に流入した防食電流は、潮位変動によって著しく影響を受けた。すなわち、防食電流は、満潮初期に急増して最大値に達した後、急減して一定値に近づき、干潮時に0となった。海水中の試片(No. 5~No. 11)に流入した防食電流は、No. 10~No. 11では満潮初期に若干増加したが、No. 5~No. 9では潮位変動による影響をほとんど受けなかった。海

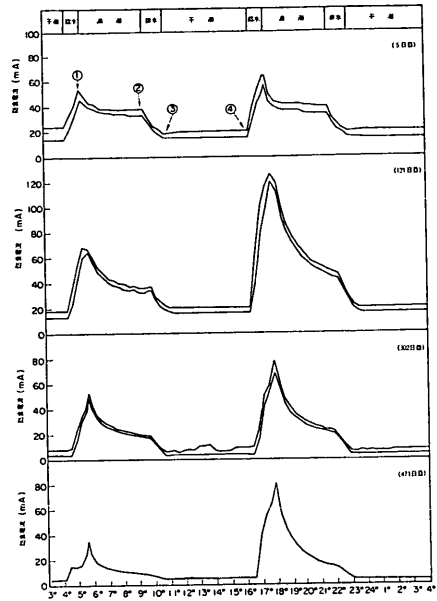


図-3.1.5 防食全電流の経日変化(実験2, 晴天)

泥中の試片(No. 1~No. 4)に流入した防食電流は、潮位変動の影響をあまり受けなかった。10日目の防食電流密度は、潮位間で $1,250\sim 1,400\text{ mA/m}^2$ (満潮初期)、 190 mA/m^2 程度(満潮終期)、海水中で 100 mA/m^2 程度、海泥中で 15 mA/m^2 程度であった。100日目と155日目の防食電流密度は、潮位間で $200\sim 240\text{ mA/m}^2$ (満潮初期)、 30 mA/m^2 (満潮終期)、海水中で $50\sim 60\text{ mA/m}^2$ 、海泥中で 12 mA/m^2 程度であった。付図-3.1.7に防食電位を -900 mV に切換えたときの防食電流の経時変化を示す。 -900 mV に切換えて1日後の防

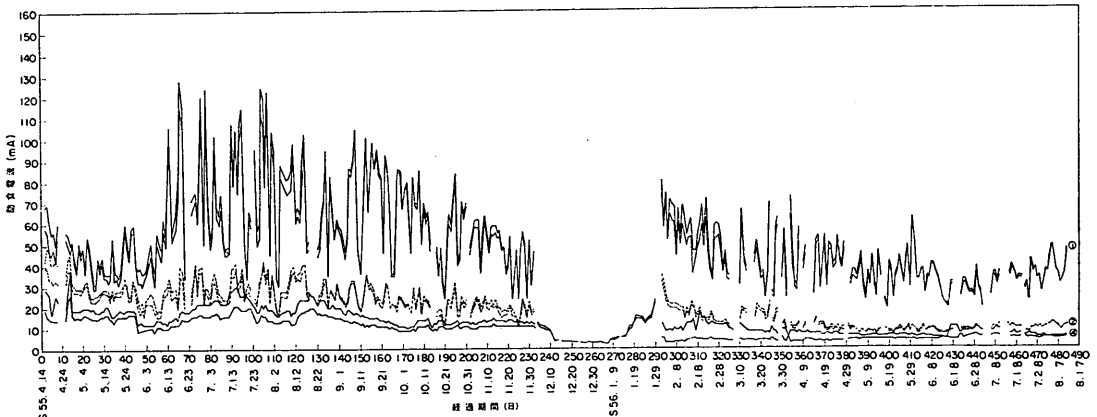


図-3.1.6 防食全電流の経日変化(実験2, 満潮(初): 午前6時)

集中腐食に対する電気防食の適用性

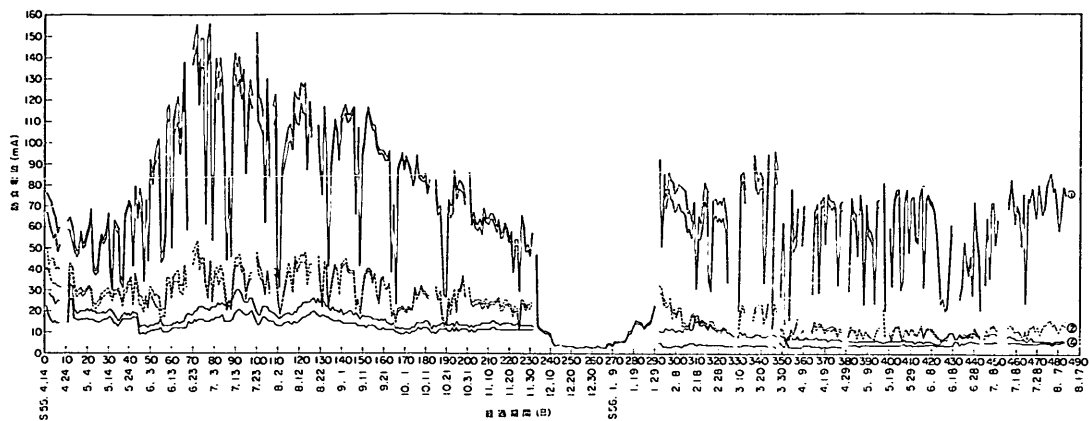


図-3.1.7 防食全電流の経日変化 (実験2, 満潮(初): 午後6時)

食電流密度は、潮位間で 275~350 mA/m² (満潮初期)、40~50 mA/m² (満潮終期)、海水中と海泥中で 50~60 mA/m² であった。

(2) 実験2 (電防試片, 防食電位: -900 mV)

防食電位 -900 mV (海水塩化銀電極基準) に保った電防試片に流入した防食全電流の潮位変動による変化例を図-3.1.5 に示す。図中の防食全電流はある幅で示してある。これは、海水の攪拌によって海水面が絶えず数 cm 波打っていたので防食全電流が変動したことによる。実験1と同じく、防食全電流は、満潮初期に急増して最大値(①)に達し、以後急減して満潮終期に一定値(②)となり、干潮時に一定値(③→④)となった。①, ②, ④の値の経日変化を図-3.1.6(満潮が6時), 図-3.1.7(満潮が18時)に示す。両図によれば、防食全電流の経日変化は、満潮初期(①)で著しく、また、午後の満潮時の①の値の方が午前満潮時の①の値より大きかった。防食全電流は測定日によって異なり、満潮初期の値の最大変動幅は 60~100 mA にもなった。例えば、78日目(晴)と79日目(雨)の防食全電流の差を求めると、約 60 mA (図-3.1.6), 約 100 mA (図-3.1.7)であった。図-3.1.6, 3.1.7 より防食全電流 (mA) を

	3箇月後	1年後	満潮時
満潮初期	50~125	20~40	午前 (図-3.1.6)
満潮終期	20~40	6~10	
干潮終期	15~30	4~6	
満潮初期	60~155	25~80	午後 (図-3.1.7)
満潮終期	20~50	6~15	
干潮終期	15~30	4~6	

みると、次のとおりであった。

電防各試片に流入した防食電流の経時変化を付図-3.1.8~3.1.10 に示す。潮位間の試片 (No. 11~No. 17) に流入した防食電流は、満潮初期に急増して最大値に達した後急減して一定値に近づき、干潮時に0となった。潮位間の各片 (No. 11~No. 17) に流入した防食電流密度 (mA/m²) は、次のとおりであった。

試片	潮位	初期(4日目)	中期(302日目)	終期(471日目)
No.12~No.17	満潮	1,300~2,000	1,500~3,100	1,600~4,100
	初期	500	200~250	
No.12~No.17	満潮	190~630	125~560	0~380
	終期	190	125	250

海水中試片 (No. 5~No. 10) に流入した防食電流密度は、潮位変動の影響をあまり受けず、わずかに L.W.L. 付近 (No. 8~No. 10) の値が満潮時に多少減少した。No. 9 と No. 5 に流入した防食電流密度 (mA/m²) は次のとおりであった。

試片	潮位	初期(4日目)	中期(302日目)	終期(471日目)
No.9	干潮時	280	60	125
	満潮時	240	50	90
No.5	干潮時	200	25	40
	満潮時	180	25	40

海泥中試片 (No. 1~No. 4) に流入した防食電流密度は、潮位変動の影響をほとんど受けなかった。No. 4 に流入した防食電流密度 (mA/m²) は、次のとおりであった。

試片	潮位	初期(4日目)	中期(302日目)	終期(471日目)
No.4	干潮時	18	16	17
	満潮時	13	10	17

(3) 実験2(マクロ試片に電防適用, 防食電位: -900 mV)

実験2のマクロ試片では, 476日目に内層さび除去が行われ, 493日目から18日間電気防食が適用された。図-3.1.8に防食全電流の経時変化の模様を示す。電気防食を満潮時に開始したところ, 防食全電流は当初280 mA以上であったが, 約4時間後の満潮終には85 mA程度に減少した。防食全電流の低減状況を, 例えば, 午後の満潮初と干潮時でみると, 満潮初の最大値は84 mA(通電4日目), 80 mA(通電11日目), 68 mA(通電17日目)と減少し, 干潮時の一定値は25 mA(通電4日目), 22 mA(通電11日目), 16 mA(通電17日目)に減少した。マクロ試片のNo.1~No.17に流入

した防食電流密度の経時変化の状況を 付図-3.1.11~3.1.14に示す。通電当初, 潮位間の試片に流入した防食電流密度は1,000~1,500 mA/m², 海水中及び海泥中試片に流入した防食電流密度は1,500~3,000 mA/m²(ただし, No.9に流入した防食電流密度は1,000 mA/m²程度)であった(付図-3.1.11参照)。このように, 潮位間の試片の防食電流密度のほうが海水中及び海泥中の試片の防食電流密度より小さかったのは, 満潮後3時間経過してから通電したためである(図-3.1.8参照)。また, 海水中の試片の防食電流密度のうち, No.9(脱錆片)の防食電流密度が最小であった。これは, 脱錆したNo.9の電位が脱錆しなかった海水中の試片の電位より80 mV卑であったことによる。また, 満潮初期に, 潮位間の試片に流入した防食電流密度は急増したが, 海水中及び海泥中の試片に流入した防食電流密度は減少した(付図-3.1.12~3.1.14参照)。このことは, マクロセルに電気防食を適用したときの電流分布の1傾向を示している。No.9の防食電流は, 通電4日目以降では脱錆しなかった海水中の試片の防食電流に近づいた。潮位間の試片に流入した防食電流密度は通電4日目~17日目では大差なかったが, 海水中及び海泥中の試片に流入した防食電流密度は, 200~380 mA/m²(4日目), 190~300 mA/m²(11日目), 150~240 mA/m²(17日目)と減少した。

3.2 マクロ腐食電流の測定

(1) 実験1(マクロ試片)

潮位間試片(No.12~No.18)に流入したマクロ腐食電流は, 満潮初期に急増して10分程度で最大値に達した後, 20分程度で最大値の数分の1に急減した。急減後, 電流は干潮開始時まで低減し, 干潮時には0となった。その模様を付図-3.2.1(初期:9日目)と付図-3.2.2(終期:155日目)に示す。潮位間試片(No.12~No.18)に流入したマクロ腐食電流密度(mA/m²)は, 次のとおりであった。

試片	潮位	初期(9日目)	終期(155日目)
No.12~No.17	満潮初期	600~900	220~300
	満潮終期	190~250	25~35
No.18	満潮初期	140	110
	満潮終期	125	20

No.18の値がNo.12~No.17に比べて小さかったのは, No.18の海水浸漬面積が他より少なかったことによる(図-2.1参照)。No.11は潮位間と海水中に接していたので, 初期には電流が流出し, 終期には電流が流入した。No.11に流入したマクロ腐食電流密度

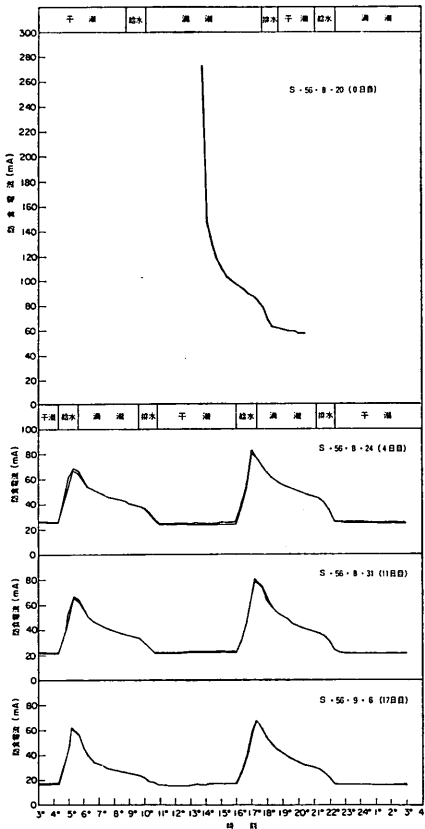


図-3.1.8 マクロ試片(1.4年経過, No.9のみ脱錆)の防食全電流の経時変化(実験2)

集中腐食に対する電気防食の適用性

(mA/m²) は、次のとおりであった。

試片	潮位	初期(9日目)	終期(155日目)
Na11	満潮初期	300(流出)	100(流入)
	満潮終期	125(流出)	25(流入)

海水中及び海泥中試片では、初期、終期とも腐食電流が流出した。海水中と海泥中試片から流出したマクロ腐食電流密度 (mA/m²) は、次のとおりであった。

環境	潮位	初期(9日目)	終期(155日目)
海水中	満潮初期	440	190
	満潮終期	190	125~140
	干潮時	60	90~100
海泥中	満潮初期	160	
	満潮終期	60	
	干潮時	<60	

図-3.2.1 (中期: 10~11日目) と図-3.2.2 (中期: 100~110日目) に、マクロ腐食電流の深度方向の分布状況を示す。初期(10日目)の満潮時では、マクロ腐食電流は海水中及び海泥中試片から流出して潮位間試片に流

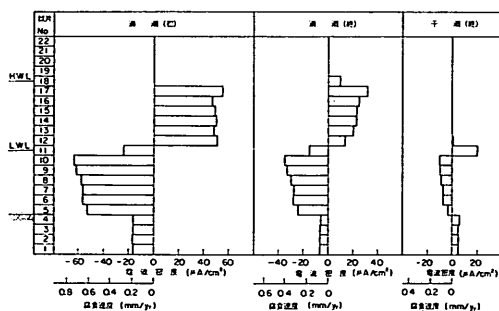


図-3.2.1 マクロ腐食電流の分布状況 (実験1, 初期: 10日~11日目) (+: 流入, -: 流出)

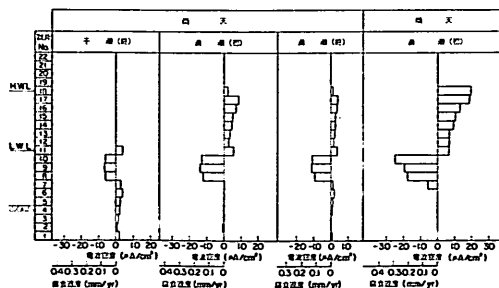


図-3.2.2 マクロ腐食電流の分布状況 (実験1, 中期: 100日~110日目) (+: 流入, -: 流出)

入した。中期(100日目)の満潮時では、マクロ腐食電流は、海水中の上部試片 (No. 7 または No. 8~No. 10) から流出し、満潮初期には潮位間試片に、満潮終期には潮位間、海水中下部、海泥中の各試片に流入した。マクロ腐食電流 (満潮初期の最大値) の経日変化は、付図-3.2.3 (満潮が午前)、付図-3.2.4 (満潮が午後) のとおりであった。両図によれば、海水中の上部試片 (No. 8~No. 10) から流出したマクロ腐食電流密度は、当初 40~50 μA/cm² であったが経日とともに低減し、約 60 日後ではほぼ一定値 (10~20 μA/cm²: 付図-3.2.3, 15~25 μA/cm²: 付図-3.2.4) になった。また、試片 No. 7 から流出した電流密度も約 60 日後にほぼ一定値 (5 μA/cm² 程度) になった。付図-3.2.4 では、No. 8 の 47 日目 (雨) と 48 日目 (晴) の満潮初期の最大値は、14 μA/cm² と 28 μA/cm² であった。すなわち、マクロ腐食電流は、天候に左右された。

(2) 実験2 (マクロ試片)

マクロ試片におけるマクロ腐食電流の流入の状況は付図-3.2.5 に示す。なお、図-2.1 に示すように、No. 11~No. 17 が潮位間、No. 5~No. 10 が海水中、No. 1~No. 4 が海泥中であった。ただし、No. 17 では、一部が潮位間に、一部が海気中にあった。潮位間の試片には、満潮初期にマクロ腐食電流が流入し、流入電流は直ちに最大値に達した後減少した。潮位間の試片に流入したマクロ腐食電流密度 (μA/cm²) は、次のとおりであった。

試片	潮位	初期(3日目)	中期(218日目)	終期(470日目)
Na12	満潮初期	20	40~100	30~50
Na13~Na17	"	80~100		
Na13~Na17	満潮終	60	30	20

試片 No. 11 (L.W.L 直上部) では、満潮時に電流が流出し、干潮時に電流が流入したが、No. 11 からの流入電流は小さかった (満潮時の流出電流は、3 日目で 30 μA/cm² 程度であったが、23 日目で 5 μA/cm² 程度に減少した)。海水中試片には、潮位変動に応じてマクロ腐食電流が流出した。初期では、満潮時に No. 5~No. 10 が流出側 (マクロセルのアノード)、干潮時に No. 8, No. 10 が流入側 (マクロセルのカソード)、No. 5~No. 7, No. 9 が流出側になった。中期では、満潮時に No. 5~No. 10 が流出側、干潮時に No. 8 と No. 9 が流出側、No. 5~No. 7, No. 10 が流入側になった。終期では、満潮時に No. 5~No. 10 が流出側に、干潮

時に No. 9, No. 10 が流出側に, No. 5~No. 8 が流入側になった。満潮初期の海水中からの流出電流密度は, 初期で $40\sim50\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (No. 6, No. 9), 中期で $30\sim40\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (No. 8, No. 9), 終期で $15\sim25\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であった。海泥中試片 (No. 1~No. 4) も, 潮位変動に伴って流出側と流入側になった。初期では, 海泥中試片は満潮時に流出側になり, 干潮時には流入側電流はほぼ0になった。中期以降では, 海泥中試片は満潮初期に流出側になったが, 満潮終期と干潮時には流入側になった。しかし, 海泥中試片からの流出電流量は小さく, 最大値で $10\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度であった。

終期に海水中試片 No. 9 の外層さび及び内層さびを除去したときのマクロ腐食電流の経時変化を付図-3.2.6 に示す。試片 No. 9 の脱錆後では, 給水時に海水中的他の試片及び海泥中試片からの電流の流出が少量あったが, 流出電流のほとんどは No. 9 から供給された。また, No. 9 は満潮時, 干潮時にかかわらず常に流出側であり, 給水時の最大流出電流密度は $130\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度 (外層さび除去後), $150\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度 (内層さび除去後), 干潮時の流出電流密度は $90\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度 (外層さび除去後), $100\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度 (内層さび除去後) であった。付図-3.2.5, 3.2.6 に示すように, マクロ腐食電流は潮位変動に伴って変化したので, マクロ腐食電流の経日変化は同じ潮位で比較する必要がある。代表試片 (No. 6, No. 8) の給水時の最大値の経日変化を付図-3.2.7 (給水: 午前), 付図-3.2.8 (給水: 午後) に示す。両図では初期の値が乏しいので当初の腐食電流の経日変化ははっきりしない。実験開始から3箇月~6箇月後の約3箇月間の流出電流はほぼ一定の範囲にあったが, 半年以降流出電流は低減して約8箇月以降にほぼ一定値になった。なお, 流出電流量が天候によって異なること, 午前の給水時より午後の給水時に流出電流量が大きいことなどは実験1と同じであった。マクロ試片における深度方向のマクロ腐食電流の分布状況を図-3.2.3 (初期) と図-3.2.4 (終期) に示す。初期では, 満潮 (初) で試片 No. 1~No. 12 が流出側, 試片 No. 13~No. 17 が流入側, 満潮 (終) で No. 1~No. 11 が流出側, No. 12~No. 17 が流入側, 干潮 (終) で No. 6, No. 7, No. 9 が流出側 (No. 1, No. 3~No. 5 も流出側であったが流出電流量は小さかった), No. 8, No. 10, No. 11 が流入側であった。終期では, 満潮 (初) で No. 1~No. 11 が流出側, No. 12~No. 17 が流入側, 満潮 (終) で No. 7, No. 9~No. 11 が流出側, No. 1~No.

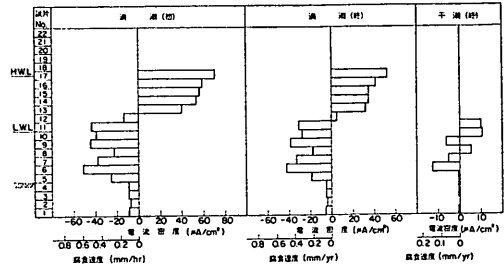


図-3.2.3 マクロ腐食電流の分布状況 (実験2, 3日目, 晴天) (+: 流入, -: 流出)

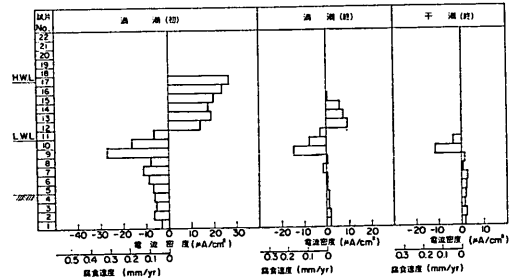


図-3.2.4 マクロ腐食電流の分布状況 (実験2, 420日目: 晴天, 脱錆前) (+: 流入, -: 流出)

6, No. 8, No. 12~No. 15 が流入側, 干潮 (終) で No. 9, No. 10 が流出側, No. 1~No. 8 が流入側であった。潮位間試片に流入した電流密度は, 初期で $40\sim70\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (満潮初), 終期で $15\sim27\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (満潮初) であった。海水中試片からの流出電流量は, 初期で $23\sim52\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (満潮初), 終期で $7\sim27\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (満潮初) であり, 特に, 終期では No. 9, No. 10 からの流出電流量が No. 5~No. 8 からの値に比べて大きかった。一方, 海泥中試片からの流出電流量は初期で $10\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度 (満潮初), 終期で $5\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度 (満潮初) であった。図-3.2.5 に晴天, 雨天によるマクロ腐食電流の

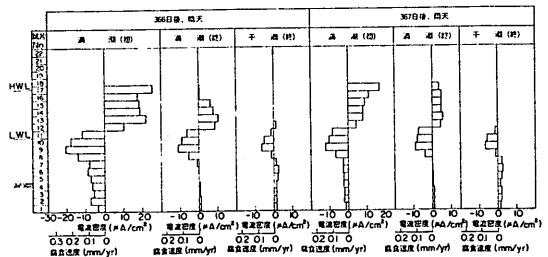


図-3.2.5 マクロ腐食電流の分布状況 (実験2) (+: 流入, -: 流出)

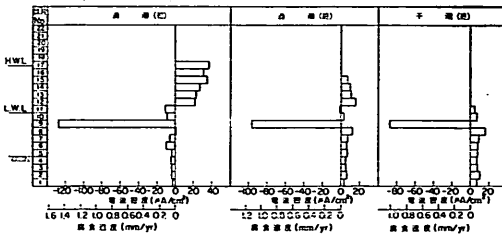


図-3.2.6 マクロ腐食電流の分布状況 (実験 2, 471 日目, 晴天, 試片 No. 9 の外層さび除去後) (+: 流入, -: 流出)

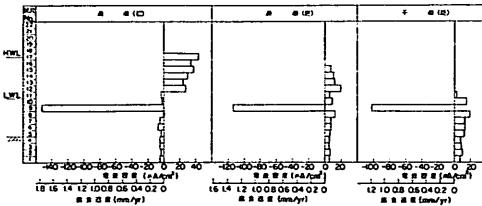


図-3.2.7 マクロ腐食電流の分布状況 (実験 2, 476 日目, 晴天, 試片 No. 9 の内層さび除去後) (+: 流入, -: 流出)

分布状況を比較した。図-3.2.5 によれば、満潮時の流出入電流量は雨天時より晴天時のほうで大きい、干潮時の流出入電流量は天候にはあまり左右されなかった。海水中試片 No. 9 のさび層を除去したときのマクロ腐食電流の分布状況を図-3.2.6 (外層さび除去)、図-3.2.7 (内層さび除去) に示す。試片 No. 9 の外層さび層を除去したところ、No. 9 からの流出電流量が急増し、内層さび除去後電流量は更にいくぶん大きくなった。満潮 (初) では海水中及び海泥中試片から流出した電流が潮位間試片に流入したが、流出電流の大半は No. 9 からであった。満潮 (終) と干潮 (終) では、流出側はほとんど No. 9 のみであった (外層さび除去後の満潮 (終) では、No. 11 も流出側であったが、その流出電流量は小さかった)。No. 9 からの流出電流量は、満潮 (初) で $130 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度 (外層さび除去後)、 $150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度 (内層さび除去後)、干潮 (終) で $90 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度 (外層さび除去後)、 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度 (内層さび除去後) であった。図-3.2.6, 3.2.7 のケースについてマクロ腐食速度とカソード、アノード表面積比 (A_c/A_a) の関係を求めると図-3.2.8 のとおりである。なお、同図には参考として Southwell 等が行った海水浸漬試験結果²⁾ からアノードが炭素鋼、カソードがステンレス鋼、モネルメタル、銅-ニッケル鋼、磷青銅のときの炭素鋼の腐食速

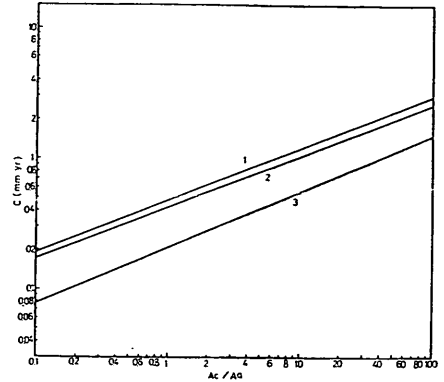


図-3.2.8 マクロ腐食速度とカソード/アノード表面積の関係 (1: No. 9 の内層さび除去, 実験 2, 2: Southwell 等の海水浸漬試験, 1 年, 3: Southwell 等の海水浸漬試験, 8, 16 年)

度と A_c/A_a の関係を示す。マクロ腐食速度 C と A_c/A_a の関係を $C \propto (A_c/A_a)^\alpha$ とすると、 α の値は内層さび除去の場合 (図-3.2.7) も Southwell 等の浸漬試験の場合も 0.4 程度であった。

3.3 電位の測定

(1) 実験 1

マイクロ試片の潮位変動による電位変化例を付図-3.3.1, 3.3.2 に示す。付図-3.3.1 は、初期 (2 日目~3 日目) の潮位間試片の電位変化例であり、付図-3.3.2 は、中期 (101 日目~102 日目) の潮位間、海水中、海泥中試片の電位変化例である。潮位間試片の電位は、干潮時に貴に、満潮時に卑になったが、海水中及び海泥中試片の電位は、潮位変動によってほとんど変化しなかった。潮位間試片の満潮時の電位は、経日とともに貴になった。すなわち、電位は -585 mV (No. 17)~ -660 mV (No. 12) (2 日目) から -445 mV (No. 17)~ -455 mV (No. 12) (101 日目) に変化した。これは、潮位間試片上のさび層の生成を示す。付図-3.3.3 にマイクロ試片の深度方向の電位変化例を示す。なお、潮位間の電位は潮位によって変化するので、付図-3.3.3 の潮位間の電位はそれぞれ異なっている。中期 (101 日目)~終期 (155 日目) では、海水中と海泥中の電位は大差なかったが、海水中上部の電位が幾分卑になった。

マクロ試片の電位の潮位変動による変化例を図-3.3.1 に示す。図にみられるように、マクロ試片の電位は、干潮時より満潮時に貴となり、この傾向は、午前の満潮時

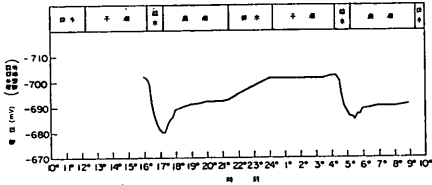


図-3.3.1 マクロ試片の電位変化 (実験1, 終期, 晴)

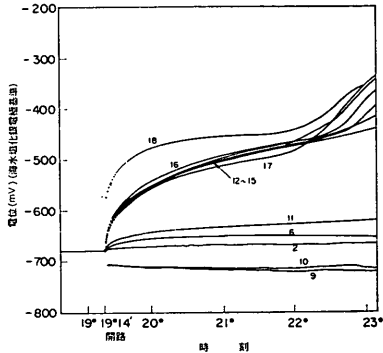


図-3.3.2 マクロ試片の開路後の電位変化 (実験1, 終期)

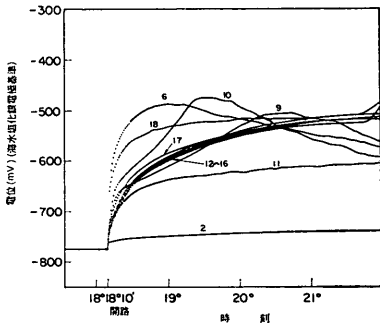


図-3.3.3 電防試片の開路後の電位変化 (実験1, 終期)

より午後の満潮時に著しかった。図-3.3.2にマクロ試片の開路後の電位変化例を示す。マクロ試片を開路にしたとき、海水中上部の試片の電位は若干卑になったが、潮位間、海水中下部、海泥中の試片の電位は貴になった。開路3時間後の電位は、潮位間で -450 mV 程度、海水中下部及び海泥中で -600 mV 程度であった。電防試片(-780 mV)の開路後の電位は、図-3.3.3に示すように、潮位間及び海水中で $-500\sim-600\text{ mV}$ 、海泥中で -750 mV 程度であった。

(2) 実験2

マイクロ試片の潮位変動による電位変化例を付図-3.3.4

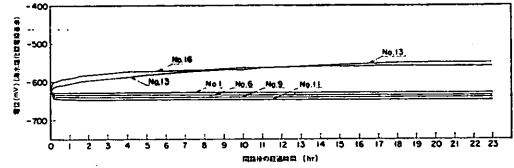


図-3.3.4 マクロ試片の開路電位変化 (実験2, 終期)

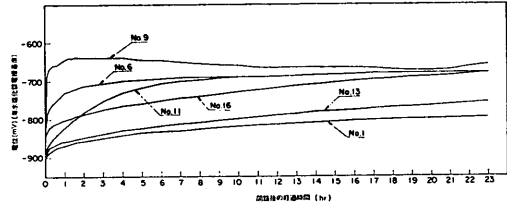


図-3.3.5 電防試片の開路電位変化 (実験2, 1年間通電後)

に示す。同図は、終期(371日目~372日目)の潮位間、海水中及び海泥中の試片の電位変化である。付図-3.3.5に、マイクロ試片の深度方向の電位変化例を示す。終期では、海水中試片の電位は海泥中試片の電位より約 20 mV 卑であった。マクロ試片の開路後の電位変化を図-3.3.4に示す。開路後、潮位間試片の電位は貴に、海水中及び海泥中試片の電位は卑に変化した。電防試片の開路後の電位変化例を図-3.3.5に示す。開路後、海水中試片の電位は急速に貴になり、 $-640\sim-700\text{ mV}$ になった。潮位間試片の電位のもどりは、海水中試片より遅く20時間後に -680 mV 程度になった。海泥中試片の電位のもどりも遅く、20時間後に -800 mV 程度になった。

3.4 腐食速度の測定

(1) 実験1

マイクロ試片、マクロ試片及び電防試片(防食電位:

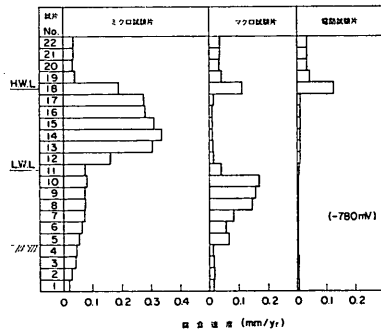


図-3.4.1 腐食速度の比較 (実験1: 潮位変動) (試験期間: 152日, 重量測定による)

集中腐食に対する電気防食の適用性

-780 mV, 海水塩化銀電極基準)の腐食速度を図-3.4.1に示す。各環境における腐食速度 (mm/y) は、次のとおりであった。

環境	マイクロ試片	マクロ試片	電防試片
海上大気中	0.038	0.04	0.034~0.044
潮位間	0.16~0.34	0.011~0.017	0.01
海水中	0.06~0.08	0.15~0.17(上部)	0.003
		0.06~0.08(下部)	
海泥中	0.02~0.04	0.012~0.017	0.003~0.007

海上大気中と潮位間では、マクロ試片と電防試片の腐食傾向は類似したが、海水中と海泥中では、電防試片の腐食速度の方が小さかった。マイクロ試片では、潮位間の腐食速度が大きく、マクロ試片と電防試片の潮位間の値の10倍程度であった。各深度におけるマイクロ試片の腐食速度を100としてマクロ試片と電防試片の腐食速度を示すと、表-3.4.1のとおりである。また、表-3.4.1に(2)式より算出した防食率を示す。なお、マクロ試片の潮位間についてもマクロ腐食電流による防食率を求めてみた。電防試片の防食率は、H.W.Lで32%、潮位間と海水中で90~97%、海泥中で60~90%であり、マクロ試片の防食率は、H.W.Lで40%、潮位間で45~97%であった。

表-3.4.1 腐食速度比及び防食率

試片 No.	環境	腐食速度比 (%)			防食率 (%)	
		マイクロ試片	マクロ試片	電防試片	マクロ試片	電防試片
22	海上大気中	100	102	102		
21	"	"	111	96		
20	"	"	110	110		
19	"	"	106	113		
18	H.W.L	"	60	68	40.3	32.3
17	潮位間	"	5	4	94.9	95.8
16	"	"	4	4	96.3	95.9
15	"	"	3	4	96.6	96.1
14	"	"	3	3	96.7	96.8
13	"	"	4	3	60.9	96.8
12	"	"	10	7	89.8	93.2
11	L.W.L	"	55	11	45.2	89.0
10	海水中	"	210	3		97.0
9	"	"	215	4		96.1
8	"	"	197	4		96.0
7	"	"	110	5		95.2
6	"	"	83	6		94.4
5	"	"	120	7		93.4
4	海泥中	"	28	6		93.4
3	"	"	37	15		85.3
2	"	"	61	24		75.7
1	"	"	85	38		61.6

(2) 実験 2

マイクロ試片、マクロ試片及び電防試片(防食電位:-900 mV, 海水塩化銀電極基準)の腐食速度を図-3.4.2に示す。なお、実験2では、ポンプの不調によって延3箇月程度干潮状態となった。このため、マクロ試片と電防試片の潮位間の腐食速度は、順調に潮位が変動したときの値より大きくなったと予想される。マイクロ試片の潮位間の3箇月分の腐食量を差引いて求めたマクロ試片と電防試片の腐食速度を図-3.4.2に点線で示した。これを腐食速度の補正值とする。図-3.4.2によれば、マイクロ試片の腐食速度は No. 18 で最大の 0.58 mm/y, No. 13~No. 17 で 0.35~0.41 mm/y, No. 11~No. 12 で 0.14~0.21 mm/y, No. 5~No. 10 で 0.12~0.17 mm/y, No. 1~No. 4 で 0.025~0.057 mm/y, No. 19~No. 22 で 0.05~0.11 mm/y であった。これに対して、マクロ試片の腐食速度は No. 17~No. 19 で 0.27~0.49 mm/y, No. 11~No. 16 で 0.06~0.17 mm/y, No. 5~No. 10 で 0.13~0.30 mm/y, No. 1~No. 4 で 0.03~0.09 mm/y, No. 20~No. 22 で 0.05 mm/y 程度であったが、補正した潮位間の腐食速度は No. 13~No. 16 で 0~0.06 mm/y, No. 12 で 0.12 mm/y 程度, No. 17 で 0.2 mm/y 程度であった。一方、電防試片の腐食速度は、No. 19 で 0.68 mm/y, No. 18 で 0.40 mm/y と大きかったが、No. 12~No. 17 で 0.09~0.13 mm/y, No. 1~No. 11 で 0.006~0.02 mm/y と小さく、また No. 20~No. 22 で 0.07~0.12 mm/y であったが、補正した潮位間の腐食速度は No. 12~No. 17 で 0.016~0.063 mm/y 程度であった。各深度におけるマイクロ試片、マクロ試片、電防試片の腐食速度を比較するために、マイクロ試片の各深度における腐食速度をそれぞれ100としてマクロ試片と電防試片の腐食速度比を算出すると表-3.4.2のとおりである。表-3.4.2によれば、電

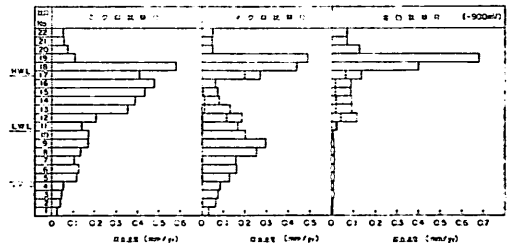


図-3.4.2 腐食速度の比較(実験2: 潮位変動, 攪拌)(試験期間: 514日, 重量測定による)(点線は補正值)

表-3.4.2 腐食速度比及び防食率

試片 No.	環境	実験 2				
		腐食速度比 (%)			防食率 (%)	
		マイクロ試片	マクロ試片	電防試片	マクロ試片	電防試片
22	海上大気中	100	97	131		
21	"	"	87	122		
20	"	"	69	167		
19	"	"	437	608		
18	"	"	76	69	24.3	30.8
17	H W L	"	(49)	(15)	(50.7)	(84.6)
			66	33	33.6	67.4
16	潮 位 間	"	(0)	(4)	(100)	(96.4)
			13	18	41.6	81.8
15	"	"	(1)	(4)	(98.8)	(96.4)
			17	20	82.6	80.2
14	"	"	(3)	(6)	(97.3)	(94.5)
			21	24	79.2	76.4
13	"	"	(17)	(6)	(83.2)	(94.1)
			37	26	63.3	74.2
12	"	"	(57)	(22)	(43.2)	(78.4)
			91	56	9.0	44.4
11	"	"	119	15		85.3
10	海 水 中	"	119	3		96.9
9	"	"	173	5		94.9
8	"	"	189	7		92.6
7	"	"	149	9		90.8
6	"	"	126	8		91.9
5	"	"	108	9		90.6
4	海 泥 中	"	151	13		86.6
3	"	"	157	19		80.8
2	"	"	155	13		87.1
1	"	"	124	23		77.5

()の数字は補正值

防試片で電防効果がみられたのは試片 No. 1~No. 18 である。したがって、電防試片 No. 1~No. 18 について (2) 式より防食率を算出した (表-3.4.2 参照)。なお、参考としてマクロ試片 No. 11~No. 18 についても防食率を算出した。電防試片の防食率は、H.W.L.(No. 17) で 67% (補正值 85%)、潮位間 (No. 12~No. 16) で 74~85% (ただし、No. 12 では 44%) (補正值 78~96%)、海水中で 90~97%、海泥中で 78~87% であった。一方、マクロ試片の防食率は H.W.L. で 34% (補正值 51%) 潮位間 (No. 13~No. 16) で 42~83% (補正值 83~100%)、潮位間の下部 (No. 12) で 9% (補正值 43%) であった。

3.5 分極曲線の測定

実験 2 のマイクロ試片について、動電位法 (10 または 50 mV/min) で求めた分極曲線を、図-3.5.1~3.5.5 に示す。図-3.5.1, 3.5.2 は潮位間試片 (No. 11, No. 13), 図-3.5.3 は海水中の上部試片 (No. 9), 図-3.5.4

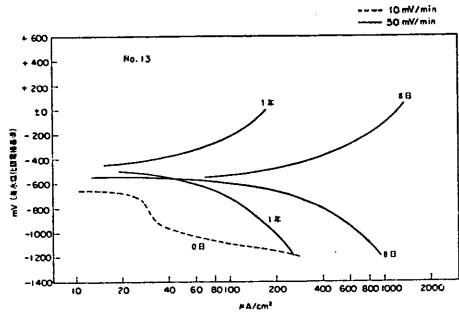


図-3.5.1 潮位間試片 (マイクロ試片 No. 13) の分極曲線 (実験 2)

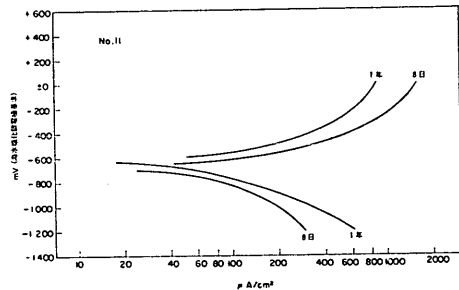


図-3.5.2 潮位間試片 (マイクロ試片 No. 11) の分極曲線 (実験 2) (50 mV/min)

は海水中の下部試片 (No. 6), 図-3.5.5 は海泥中試片 (No. 3) の分極曲線である。図-3.5.1, 3.5.2 を比較すると、潮位間試片 No. 11 と No. 13 では分極曲線の傾向が異なった。すなわち、No. 13 ではアノード、カソード分極は 1 年後に増大したが、No. 11 では 1 年後にアノード分極は増大、カソード分極は減少した。また、アノード、カソード分極曲線の経日変化の幅を比較すると、No. 13 のほうが No. 11 よりかなり大きかった。参考までに、分極曲線より腐食電流密度を推定すると、試片 No. 13 では 150~200 μA/cm² (8 日目), 30 μA/cm² 程度 (1 年目)、試片 No. 11 では 60 μA/cm² 程度 (8 日目), 40~60 μA/cm² (1 年目) となる。また、試片 No. 13 では暴露当初 (0 日目) のカソード分極曲線が示されているので、これより所要防食電流密度を推定すると約 250 mA/m² となる。一方、発錆片 (8 日目, 1 年目) では 0 日目のようなはっきりしたカソード分極曲線が得られなかったので 0 日目と同じ要領で所要防食電流密度を推定することは難しい。したがって、-900 mV までに分極したのに必要な防食電流密度と比較してみると、約 330 mA/m² (0 日目)、約 5,100 mA/m² (8 日目)、約 2,000 mA/m² (1 年目) であっ

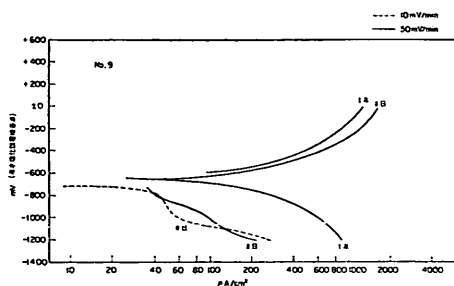


図-3.5.3 海水中試片（マイクロ試片 No. 9）の分極曲線（実験 2）

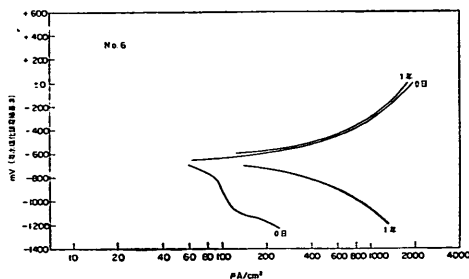


図-3.5.4 海水中試片（マイクロ試片 No. 6）の分極曲線（実験 2）(50mV/min)

た(図-3.5.1 参照)。次に、海水中試片 No. 9, No. 6 の分極曲線を比較すると、海水中の上部と下部における分極曲線の差異はあまりなかった。すなわち、どちらも、アノード分極の経日変化はあまりなかったが、カソード分極は経日とともに減少した。例えば、 -900 mV に分極するのに要した防食電流密度を比較してみると、試片 No. 9 では約 700 mA/m^2 (8日目) から約 $4,300\text{ mA/m}^2$ (1年目) に、試片 No. 6 では約 $1,000\text{ mA/m}^2$ (0日目) から約 $6,000\text{ mA/m}^2$ (1年目) に増加した(図-3.5.3, 3.5.4 参照)。なお、海水中試片も潮位間試片と同じく経日とともに明瞭な酸素の拡散による分極曲線が得られなくなった。このため、分極曲線から腐食速度を推定することはあまり正確ではないが、参考までに腐食電流密度を推定すると試片 No. 9 では約 $20\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ (8日目)、約 $60\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ (1年目)、試片 No. 6 では約 $70\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ 、約 $100\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ (1年目) となった。一方、海泥中試片 No. 3 の分極曲線の傾向は海水中試片の傾向に類似した(図-3.5.5 参照)。すなわち、アノード分極は経日によって大差なかったが、カソード分極は経日により減少した。海泥中試片 No. 3 のカソード分極曲線も海水中試片のものと同じく経日とともに明瞭な酸素の還元がみられなくなった。参考までに、分極曲線

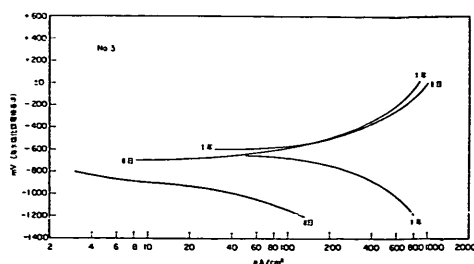


図-3.5.5 海泥中試片（マイクロ試片 No. 3）の分極曲線（実験 2）(50 mV/min)

より試片 No. 3 の腐食電流密度を推定してみると、約 $2\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ (8日目) から約 $50\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ (1年目) となった。また、 -900 mV までに分極するに要した防食電流密度を比較すると、約 100 mA/m^2 (8日目)、約 $4,200\text{ mA/m}^2$ (1年目) であった。

3.6 抵抗の測定

実験 1 の抵抗測定結果を 付表-3.6.1 に、実験 2 の抵抗測定結果を 付表-3.6.2 に示す。潮位間の抵抗値は、潮位によって異なるため一概には比較できない。海水中と海泥中の抵抗は、実験 1 より実験 2 で大きく、また、経日により減少した。実験 1 では、マクロ試片の抵抗は、マイクロ試片の値と大差なかった。実験 2 では、マイクロ試片、マクロ試片、電防試片の抵抗値は、大差なかった。

3.7 試験片の観察

実験 1

図-2.1 に示すように、実験 1 では、試片 No. 1~No. 4 が海泥中、No. 5~No. 10 と No. 11 の下半分が海水中、No. 11 の上半分と No. 12~No. 17, No. 18 の約 1/4 が潮位間、No. 18 の 3/4 と No. 19~No. 22 が海気中に暴露された。回収時の発錆状況を写真-1 (マイクロ試片)、写真-2 (マクロ試片)、写真-3 (電防試片) に、脱錆後の鋼材表面を写真-4 (マイクロ試片)、写真-5 (マクロ試片)、写真-6 (電防試片) に示す。

海気中

試片 No. 19~No. 22 は、3者試片とも同じように発錆した。さび層は薄く、表面は赤褐色であり、脱錆後の表面は3者とも平滑であった。試片 No. 18 の約 1/4 のところが H.W.L であったため、H.W.L 下の部分は潮位間の試片の表面に類似、H.W.L 直上部は石灰質皮膜と赤褐色のさび層の混合状態であった。このような、No. 18 の表面状況は3者とも同様であったが、脱錆面ではマイクロ試片に凹凸が多くみられた。

潮位間

脱錆前のマイクロ試片では、No. 18 の下 1/5 と No. 17 は白っぽいさび層に被覆されたが、No. 16~No. 12, No. 11 の上 1/2 は黒褐色のさび層に被覆された。これに対して、マクロ試片と電防試片では、No. 12~No. 17, No. 18 の下 1/5 は石灰質の白っぽい皮膜に覆われた。No. 11 の上 1/2 は、マクロ試片では暗褐色のさび層に覆われ、電防試片では灰色であった。脱錆後、マイクロ試片の No. 13~No. 17, No. 18 下 1/4 の表面では腐食による凹凸が著しかったが、No. 11 上 1/2~No. 12 の表面はそれほど粗くなかった。一方、マクロ試片と電防試片では、No. 12~No. 17, No. 18 下 1/5 はほとんど平滑であったが、No. 11 1/2 上には溝状腐食跡がみられた。

海水中

脱錆前の海水中試片 No. 5~No. 10, No. 11 下 1/2 は、3 者ともさび層に覆われた。マイクロ試片とマクロ試片のさび層は赤褐色であったが、電防試片のさび層には暗褐色の部分が多かった。脱錆後のマイクロ試片 No. 5~No. 10, No. 11 下 1/2 は比較的平滑であり、脱錆後の電防試片 No. 5~No. 10, No. 11 下 1/2 はほとんど平滑であった。これに対して、脱錆後のマクロ試片では、No. 5~No. 7 と No. 11 下 1/2 は比較的平滑であったが、No. 8~No. 10 では小さな凹凸が目立った。

海泥中

回収時の海泥中試片は、3 者とも海泥(砂層)が付着しており、表面は黒色であった。脱錆後の試片は3 者ともほぼ平滑であった。

実験 2

実験 2 では 図-2.1 に示すように、試片 No. 1~No. 4 が海泥中、No. 5~No. 10 が海水中、No. 11~No. 16, No. 17 下 1/2 が潮位間、No. 17 上 1/2, No. 18~No. 22 が海上大気中に暴露された。回収時の発錆状況を写真-7(マイクロ試片)、写真-8(マクロ試片)、写真-9(電防試片)に、脱錆後の鋼材表面を写真 10(マイクロ試片)、写真-11(マクロ試片)、写真-12(電防試片)に示す。

海気中

回収時のマイクロ試片では、No. 19~No. 22 は大気暴露により生じた暗褐色のさび層に覆われたが、No. 17 の上 1/2~No. 18 は波の影響を受けて潮位間のように厚いさび層の上に石灰質の白色皮膜に覆われていた。マクロ試片と電防試片では、No. 17 の上 1/2, No. 18, No.

19 の下 2/3 が波の影響を受け、No. 19 の上 1/3, No. 20~No. 22 が大気暴露の暗褐色のさび層に覆われた。脱錆後のマイクロ試片では、No. 17 の上 1/2 と No. 18 の下 1/2 に小さな穴が散見され、No. 18 の上 1/2 と No. 19 の 1 部では腐食して肉厚が 0 となったが、No. 19 の上 No. 20~No. 22 の表面は比較的平滑であった。マクロ試片では、No. 17 の上 1/2 と No. 18 に小さな穴が散見され、No. 19 の下 2/3 は腐食により消失し、No. 19 の上 1/3, No. 20~No. 22 は比較的平滑であった。電防試片では、No. 18 に小さな穴が散見され、No. 19 は全面消失し、No. 20 に多少凹みが目立ったが、No. 21~No. 22 は比較的平滑であった。

潮位間

回収時のマイクロ試片 No. 11~No. 16, No. 17 の下 1/2 は、暗褐色の厚いさび層に覆われた。マクロ試片では、No. 11 と No. 12 の下 1/2 は暗褐色の厚いさび層に覆われたが、No. 12 の上 1/2, No. 13~No. 16, No. 17 の下 1/2 は暗褐色と白色物質に覆われ、わずかに試片の周辺部に発錆箇所がみられた。一方、電防試片 No. 11~No. 16, No. 17 の下 1/2 では、黒色と白色物質が付着した状態であり、更に、No. 11 に赤褐色のさびが散見された。脱錆後の鋼材面をみると、マイクロ試片には凹凸がみられたが、マクロ試片と電防試片は比較的平滑であった。

海水中

脱錆前のマイクロ試片 No. 5~No. 10 (No. 9 を除く) は、赤褐色のさび層と黒い付着物に覆われた。なお、No. 9 では回収直前に電位変化を測定するためにさび層が除去された。このため、No. 9 のさび層は比較的新しいものであった。マクロ試片 No. 5~No. 10 (No. 9 を除く) では、さび層の上を黒色の付着物が覆っていた。ただし、No. 9 では脱錆によるマクロ腐食電流変化を測定するために、回収直前にさび層が除去された。電防試片 No. 5~No. 10 には、白色と黒色物質が付着したほか、No. 8, No. 9, No. 10 に発錆が少しみられた。脱錆後のマイクロ試片とマクロ試片 No. 5~No. 10 には凹凸がみられたが、電防試片 No. 5~No. 10 の表面はほとんど平滑であった。

海泥中

回収時の海泥中試片は、マイクロ、マクロ及び電防の 3 試片とも黒色の海泥(砂層)で覆われていた。脱錆後のマイクロ試片及びマクロ試片 No. 1~No. 4 には小さな凹みが見られたが、電防試片 No. 1~No. 4 はほとんど

平滑であった。

3.8 水質分析及び気象条件

付表-3.8.1 に海水の水質分析結果を示す。分析結果を海水成分例と比較してみると、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} の分析値に例示した値より多少低目であった。実験1の気象データを付図-3.8.1~3 に示す。付図-3.8.1 は満潮時（初）（17時）の気温、湿度、晴雨及び強風の有無を示し、付図-3.8.2 は10時の風速測定値であり、付図-3.8.3 は昭和53年11月27日~29日の気温、湿度の実測値である。実験2の気象データを付図-3.8.4、3.8.5 に示す。付図-3.8.4 は満潮初期（17時測定）の気温、湿度、晴雨及び強風の有無を示し、付図-3.8.5 は10時測定した風速測定値である。

4. 考 察

4.1 集中腐食に対する電気防食の適用性

港湾鋼構造体にシミュレートしたマクロ試片では、潮位間の鋼材片の電位が干潮面下の鋼材片の電位より相対的に貴になった。この結果、潮位間の試片がカソード、干潮面下の試片がアノードとなったマクロセルが発生し、マクロ腐食電流がアノード部よりカソード部に流れた（例えば、図-3.2.1、3.2.3 参照）。満潮時（晴天時）には、海水中及び海泥中の試片がマクロセルのアノード部となったが、満潮時（雨天時）又は干潮時には海水中の試片がアノード部となった（図-3.2.2、3.2.5 参照）。また、終期には、海水中上部からの流出電流の方が海水中下部からの流出電流より大きくなった。更に、さび層を除去した海水中の試片の電位はさび層除去前より約80mV 卑となり、脱錆箇所からの流出電流量が急増した（図-3.2.6、3.2.7 参照）。以上のように、マクロ試片上では、相対的な電位の貴卑のためマクロセルが発生しており、マクロ腐食電流の流出が著しかったアノード部に腐食が集中した。いま、マクセルに対する防食電流の流れを簡単にするために、マクロセルのカソードを潮位間の試片、アノードを海水中の試片とする。潮位間の試片の電極電位を E_i 、海水中の試片の電極電位を E_{sw} とすると、両電極電位の差 $E_i - E_{sw}$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} E_i - E_{sw} &= (\varphi_i^M - \varphi_i^S) - (\varphi_{sw}^M - \varphi_{sw}^S) \\ &= (\varphi_i^M - \varphi_{sw}^M) - (\varphi_i^S - \varphi_{sw}^S) \quad \dots(3) \end{aligned}$$

ただし、 φ^M : 電極の電位

φ^S : 電極近傍の溶液の電位

潮位間の試片と海水中の試片を短絡させた場合には、 $\varphi_i^M - \varphi_{sw}^M = 0$ と考えられるから電極電位の差は (4)

式となる。

$$E_i - E_{sw} = -(\varphi_i^S - \varphi_{sw}^S) \quad \dots\dots\dots(4)$$

短絡させたことによって海水中の試片がアノードとなり潮位間の試片がカソードとなるマクロセルが形成され、潮位間の試片から海水中の試片に向けてマクロ腐食電流が短絡回路内を流れた。海水中ではアノード（海水中の試片）からカソード（潮位間の試片）に向けて腐食電流が流れた結果 $\varphi_{sw}^S > \varphi_i^S$ となる。式 (4) に示すように両者の電極電位の差はちょうど溶液内の電位差の逆向きになる。いま、マクセルに外部から直流電流を流す、すなわちマクセルに外部電源法を適用すると、 $\varphi_{sw}^S > \varphi_i^S$ の関係から防食電流は φ^S の小さいカソード（潮位間の試片）に優先的に流入することになる。また、Fe より卑な金属（Al、Mg、Zn など）を鋼構造物に接続して防食電流を供給する流電陽極法を適用する場合には、 $\varphi_{Al}^S > \varphi_{sw}^S > \varphi_i^S$ （ただし、 φ_{Al}^S は Al 合金陽極近傍の溶液の電位）の関係が成立し、海水中ではアノード（Al 合金陽極）から流出した防食電流がカソード（潮位間の試片及び海水中の試片）に流入する。この場合にも、 φ^S が小さい潮位間の試片に優先的に流入する（付図-3.1.11 参照）。したがって、電気防食をマクロセルに適用したとき、防食電流がカソード部に優先的に流入し、この結果、マクロ腐食電流は減少する。

電防試片の防食電位（海水塩化銀電極基準）は、実験1では、-780mV、実験2では -900mV であった。実験1の防食試片の防食率は、潮位間で 96%、L.W.L（試験 No. 11）で、89%、海水中で 95%、海泥中で 79% であった（表-3.4.1 参照）。これに対して H.W.L（試片 No. 18）の防食率は 32% であった。これは、試片 No. 18 の中央部が H.W.L であったため、H.W.L 上の影響が含まれたものとみられる。一方、実験2の防食試片の防食率は、潮位間で 74%（補正值 91%）、海水中で 93%、海泥中で 83% であった（表-3.4.2 参照）。H.W.L（試片 No. 17）の防食率が 67%（補正值 85%）と低かったのは、試片 No. 17 の上半分が海上大気中にさらされたためである。実験1より実験2のほうが潮位間の防食率が低かったのは、実験2ではポンプの不調のため延約3カ月間潮位の変動が停止したことによると推定される。ポンプ不調期間を考慮して潮位間の防食率を算出すると 91% となり、実験1の 96% に近似した。防食率を参照すると、実験1、2とも電気防食の適用範囲は H.W.L 以下であった。海水中の防食率は、実験1、2とも 93% 以上と高率であった。海泥中の防

食率は 80% 程度であり、海水中の防食率に比べて約 10% 小さかった。しかし、海泥中の無防食試片（マクロ試片）の腐食速度は海水中の腐食速度に比べて小さかったため、海泥中の防食率 10% の低下はあまり問題ではない。一般に、防食率を (2) 式から算出するとき、 $4W_0$ （無防食のときの重量減量腐食量）として同一環境におけるマイクロ試片の腐食量を使用する。表-3.4.1, 3.4.2 の防食率算出にも $4W_0$ としてマイクロ試片の腐食量を使用した。しかし、マクロ試片では、L.W.L 直下部の腐食量は同一深度のマイクロ試片の腐食量を上廻った（例えば、図-3.4.2 参照）。したがって、 $4W_0$ の値にマクロ試片の腐食量を代入すると防食率は表-3.4.1, 3.4.2 の値より大きくなる。例えば、電防試片の No. 9 について防食率を比較してみる。実験 1 の防食率は 96.1%（表-3.4.1）、実験 2 の防食率は 94.9%（表-3.4.2）であったが、(2) 式の $4W_0$ にマクロ試片の腐食量を代入すると防食率は実験 1 で 98.2%、実験 2 で 97.1% となる。また、図-3.2.7 に示すように、No. 9 のマクロ腐食速度が 1 mm/y を越える場合、防食率は 99% 以上となる。この結果、集中腐食の著しい箇所に対して電気防食は有効である。

4.2 所要防食電流

防食電流には、電防試片全体を対象としたものと各試片を対象としたものがある。ここでは、前者を防食全電流、後者を各試片に流入した防食電流（密度）という。防食全電流は潮位変動に伴って変化した。変化は特に満潮時に著しく、満潮初期には防食電流量は干潮時の値の数倍～10倍程度に急増した（図-3.3.1, 3.1.5 参照）。また、防食全電流量が干潮時から満潮時にかけて増加したとき、その増加の割合は雨天時より晴天時のときに大きく、更に、同じ晴天時でも午前の満潮時より午後の満潮時のときに防食全電流量は大きかった。防食全電流量は満潮初期に急増して最大値に達した後、満潮終期にかけて低減した。更に、防食全電流量は潮位の低下に伴って減少し、干潮時にはほぼ一定値になった。満潮初期に防食全電流量が急増したのは、干潮時に大気中で酸化されて Fe(III) 酸化物となったさび層が海水に浸漬したとき、かなり貴な電位になったためである。すなわち、潮位間の ϕ^s （電極近傍の溶液の電位）が著しく小さくなったためである。防食全電流量は経日とともに減少して一定値に近づいた（図-3.1.2, 3.1.3, 3.1.6, 3.1.7 参照）。実験 1 では約 120 日後に、満潮初期の値は 30 mA 前後から 3 mA 程度に、干潮時の値は約 5 mA から 3 mA 程

表-4.1 潮位間の防食電流密度

実験	防食電流密度 (mA/m ²)				低減率	
	初期		終期		初期	終期
	満潮初	満潮終	満潮初	満潮終		
1	1,250	250	275	38	0.2	0.1
	1,400	300	475			
	1,375	250	1,750			
2	1,375	250	1,750	125	0.2	0.1
	2,000	500	4,100			
			375			

度に減少し、実験 2 では約 360 日後に、満潮初期の値は 150 mA 前後から 50 mA 程度に、干潮時の値は 20 mA 程度から 5 mA 程度に減少した。ただし、実験 2 では満潮初期の値は天候に著しく左右されたので、実験 1 ほど明らかに防食全電流の減少割合を算出し難かった。防食全電流量の低減は、電防試片の表面に生成する付着物（腐食生成物+石灰質被膜）によるものと思われる。電防試片を開路にしたとき、潮位間及び海水中の試片は -400 mV ~ -600 mV 程度の貴な値に戻った（図-3.3, 3.3.5 参照）。このことは、防食電流の流入により防食皮膜が形成されたことを裏付ける。

潮位間、海水中及び海泥中の試片に流入した防食電流密度を比較すると、潮位間の試片に流入した電流密度が最も大きかった。潮位間の試片（No. 12~No. 17）に流入した防食電流密度は、表-4.1 のとおりであった。清浄海域における海水中の防食電流密度（初期値）の標準値である 100 mA/m² より、潮位間の試片に流入した防食電流密度は、実験 1 の初期で 10 数倍（満潮初）、実験 2 の初期で 15~20 倍（満潮初）大きかった。このように、潮位間の防食電流密度が海水中の標準値を大幅に上廻ったのは、海水中が OH⁻ の生成反応であるのに対して、潮位間ではサビ層の還元反応であることに起因すると考えられる。このことは、実験 2 では、初期より終期に潮位間の防食電流密度（満潮初）が大きくなった原因とも考えられる。潮位間の防食電流密度の経時変化割合（低減率）は、満潮時で比較すると、初期で 0.2 程度、終期で 0.1 程度であった。海水中の試片に流入した防食電流密度は、表-4.2 のとおりであった。海水中の防食電流密度（設計の初期値）として、一般に 100 mA/m² の標準値がとられている。これに対して、実験 1（初期）の海水中の試片に流入した防食電流密度は、上部試片については干潮・満潮に関係なく 100 mA/m² 以上、下部試片については干潮終と満潮終とも 100 mA/m² 以下、満潮初では 100 mA/m² 以上であった。一方、実

集中腐食に対する電気防食の適用性

表-4.2 海水中の試片に流入した防食電流密度

実験	海水中 試片の 位置	防食電流密度 (mA/m ²)						防食電流密度の低減率		
		実験の初期			実験の終期 ^α			干潮終	満潮初	満潮終
		干潮終	満潮初	満潮終	干潮終	満潮初	満潮終			
1	上部	123	200	100	63	63	88	0.5	0.3	0.7
		}	}	}	}	}	}			
		175 (149)	250 (225)	150 (125)	81 (72)	88 (76)	94 (91)			
	下部	56	125	56	31	38	63	0.6	0.3	1
		}	}	}	}	}	}			
		100 (78)	190 (158)	88 (72)	56 (44)	63 (51)	75 (69)			
2	上部	275	238	238	125	94	75	0.4	0.4	0.4
		}	}	}	}	}	}			
		390 (333)	288 (263)	288 (263)	138 (132)	125 (110)	119 (97)			
	下部	175	169	169	31	31	38	0.2	0.2	0.2
		}	}	}	}	}	}			
		263 (219)	225 (197)	225 (197)	44 (38)	44 (38)	44 (41)			

※実験1の防食期間：0.4年

実験2の防食期間：1.3年

験2(初期)の海水中の試片に流入した防食電流密度は、試片の取付深度及び干潮・満潮に関係なく 100 mA/m² 以上であった。本実験の防食電流密度はポテンショ・スタットを用いて一定の防食電位(実験1では -780 mV, 実験2では -900 mV, 海水塩化銀電極基準)に保ったときの値であるから、初期値 100 mA/m² で設計された流電陽極方式では、清浄海域でも場合によっては防食電流密度(初期値)が適正値を下廻ることになり兼ねない。海水中の試片に流入した防食電流密度は経年とともに低減する傾向があった。いま、実験の終期の値/実験の初期の値を防食電流密度の低減率とし、海水中の上部及び下部の試片について低減率を算出すると表-4.2 のようになった。実験1の低減率は上部試片で 0.3~0.7, 下部試片で 0.3~1.0 と潮位によって異なったが、実験2の低減率は潮位に左右されずに上部試片で 0.4, 下部試片で 0.2 であった。海泥中の試片に流入した防食電流密度は防食期間によってあまり変化せず、実験1の値は 10~20 mA/m², 実験2の値は 25~30 mA/m² であった。以上のように、防食電流密度及びその低減率は潮位間、海水中、海泥中において異なった。したがって、所要防食電流量の算出は環境ごとに行う必要があるが、防食設計では現在のところ潮位間は海水中に含まれている。しかし、潮位間の防食電流密度は海水中の値に比べて大きいので、潮位差の大きいところほど潮位間と海水中とを別々に防食電流を算出することが实际的である。

各腐食環境における試片の腐食特性をみるために、マイクロ試片について分極曲線を測定した(図-3.5.1~3.5.5 参照)。例えば、暴露期間が1年の試片の分極曲線で比較してみると、潮位間のアノード、カソード分極が、海水中及び海泥中のアノード、カソード分極より大きかった。したがって、分極曲線から推定した腐食速度を比較してみると、潮位間の試片のほうが海水中及び海泥中の試片より小さかった。これに対して、重量測定から求めたマイクロ腐食速度では、潮位間の試片のほうが海水中及び海泥中の試片より大きかった(図-3.4.1, 3.4.2 参照)。先述したように、潮位間の試片上のカソード反応は還元反応、海水中及び海泥中の試片上のカソード反応はOH⁻の反応による。これに対して、海水中及び海泥中の試片をカソード分極したとき、OH⁻の反応よりはるかに分極の小さい還元反応が観測されたため、上記の矛盾がおこったものと解釈される。海水中及び海泥中試片のカソード分極曲線は自然電位における試片の腐食速度には寄与しないが、自然電位における発錆試片を電気防食する際の所要防食電流量(初期)に関する情報を提供する。例えば、1年経過したマイクロ試片 No. 9 の自然電位は約 -600 mV(海水塩化銀電極基準)であり、これを -900 mV(海水塩化銀電極基準)までカソード分極させるのに要した電流密度は 4,000 mA/m² 程度であった(図-3.5.3 参照)。ただし、この値は 50 mV/min の速度で分極したときの値である。一方、発錆したマクロ

表-4.3 所要防食電流（初期値）の比較（実験2）

ケース	環境	防食面積 (cm ²)	防食電流密度 (mA/m ²)	防食電流 (mA)	防食全電流 (mA)
①	海水中	(26+48)×10=740	100	740×10 ⁻⁴ ×100=7.4	8.04
	海泥中	32×10=320	20	320×10 ⁻⁴ ×20=0.64	
②	潮位間	52×10=520	1,000	520×10 ⁻⁴ × $\frac{1000}{2}$ =26	31.44
	海水中	48×10=480	100	480×10 ⁻⁴ ×100=4.8	
③	海泥中	32×10=320	20	320×10 ⁻⁴ ×20=0.64	38.64
	潮位間	52×10=520	1,000	520×10 ⁻⁴ × $\frac{1000}{2}$ =26	
④	海水中	48×10=480	200	480×10 ⁻⁴ ×250=12	57.44
	海泥中	32×10=320	20	320×10 ⁻⁴ ×20=0.64	
④	潮位間	52×10=520	1,000	520×10 ⁻⁴ ×1000=52	57.44
	海水中	48×10=480	100	480×10 ⁻⁴ ×100=4.8	
④	海泥中	32×10=320	20	320×10 ⁻⁴ ×20=0.64	57.44
	海水中	48×10=480	100	480×10 ⁻⁴ ×100=4.8	

試片の防食電流密度（初期値）は海水中及び海泥中で 1,500~3,000 mA/m² であった（付図-3.1.11 参照）。

電気防食を港湾鋼構造物に適用するとき、所要防食電流量（初期値）は（8）式により算出される。

$$S_1 \times A_1 + S_2 \times A_2 = I \text{ (mA)} \dots\dots\dots (8)$$

S₁: 海水中の防食電流密度 (mA/m²)

S₂: 海泥中の防食電流密度 (mA/m²)

A₁: 海水中の防食面積 (m²)

A₂: 海泥中の防食面積 (m²)

A₁ は M.S.L~海底面間の表面積であり、M.S.L~L.W.L 間も海水中に含めてある。しかし、上述のように潮位間の試片に流入した防食電流密度は海水中及び海泥中の試片に流入した防食電流密度に比べてかなり大きかったので、（8）式による所要防食電流量の算出に際して潮位間の試片に流入した値を無視できない。また、潮位差の大きいところでは満潮時に H.W.L~M.S.L 間に流入する防食電流も無視できない。したがって、所要防食電流量を（8）式による方法と潮位間の防食電流密度を考慮した方法とで比較してみた。表-4.3 に実験2の電防試片について算出した所要防食電流量を示す。ケース①は従来の方法、ケース②は満潮時にのみ潮位間の防食電流密度を 1,000 mA/m²（図-3.1.15 参照）とした方法、ケース③はケース②にさらに海水中の防食電流密度を 200 mA/m²（図-3.1.15 参照）とした方法、④は潮位に関係なく潮位間の防食電流密度を 1,000 mA/m²とした方法である。表-4.3 の値を図-3.1.5 と照合すると、ケース①の 8 mA は明らかに実測値より低すぎるのがわかる。ただし、電防試片では潮位間の表面積が海水中の表面積を上廻ったため、表-4.3 では潮位間

の防食電流量が防食全電流に占める割合が一般の構造物の場合より大きくなった。一方、現地の潮位変動は複雑であること、潮位間の試片に流入する防食電流密度は試片の干潮時の乾燥程度に左右されること、波浪があることなどのため、実海域での所要防食電流量値の補正は実験モデルのように簡単ではない。次に、現地における所要防食電流の測定例を示す。図-4.1 に示す鋼管杭に電

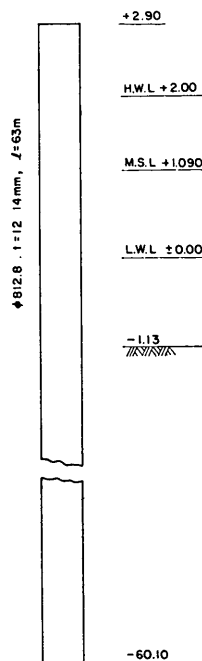


図-4.1 現地における防食杭の寸法

集中腐食に対する電気防食の適用性

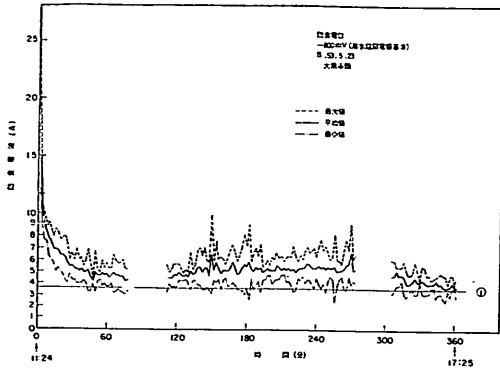


図-4.2 現地における防食電流の経時変化
(防食電位: -800 mV)

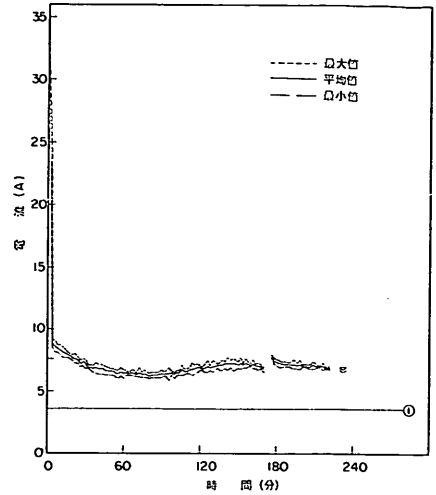


図-4.3 現地における防食電流の経時変化
(防食電位: -900 mV)

気防食を適用して所要防食電流量を測定した。電気防食は外部電源法で、防食電位はポテンショ・スタットで-800 mV (海水塩化銀電極基準) と-900 mV (海水塩化銀電極基準) の2とおりに保たれた。通電は干潮時から満潮時にかけて行われ、このときの防食電流の経時変化は図-4.2 (防食電位: -800 mV) 図-4.3 (防食電位: -900 mV) に示すとおりであった。両図によれば、通電開始時の防食電流量は25 A(-800 mA)~35 A(-900 mV)程度であったが、通電直後に電流量は1/3程度に急減し通電後1時間で約4.2 A(-800 mV)、約6.4 A(-900 mV)となった。低減した値は両防食電位における干潮時の防食電流量(平均値)であるから、海水中と海泥中に流入した電流量の和となる。いま、海泥中の防食電流密度を0.02 A/m²と仮定すると、海泥中の防食電流量は約3 Aとなる。したがって、1.2 A(-800 mV)、3.4 A(-900 mV)が海水中に流入し、防食電流密度は0.34 A/m²(-800 mV)、0.97 A/m²(-900 mV)となる。一方、満潮時には防食電流量は約5.6 A(-800 mV)、約7.4 A(-900 mV)となった。この結果、潮位間に流入した防食電流量は、1.4 A(-800 mV)、1.0 A(-900

mV)となり、潮位間の防食電流密度は0.44 A/m²(-800 mV)、0.31 A/m²(-900 mV)となる。なお、電流測定時の潮位は、付図-4.1に示すように上昇したので、潮位間を1.25 m(+1.5 m~+0.25 m)、海水中を1.38 m(0.25 m+1.13 m)、海泥中を58.97 m(60.1 m-1.13 m)とした。潮位間の防食電流密度は、0.3~0.4 A/m²で水槽実験の値1.0 A/m²より小さかったこと、防食電流は、満潮開始後3時間増加した後減少に転じたこと(防食電位: -800 mV)、防食電位が-900 mVのときより-800 mVのときの防食電流の振幅が大きかったこと、などは現地における波浪の影響と考えられる。なお、-800 mVでの電流測定日は、強風であった。海水中の防食電流密度が0.3~1 A/m²と大きかったのは、防食杭が打設後1年以上経過していたため、さび層の還元電流が加算されたものと推察される。表-4.4に、現地の防食杭について算出した所要防食電流(初期値)を示す。

表-4.4 所要防食電流(初期値)の比較(現地防食杭)

ケース	環境	防食面積 (m ²)	防食電流密度 (A/m ²)	防食電流量 (A) (初期値)	
①	海水中	(1.09+1.13) π × 0.8128 = 5.67	0.1	5.67 × 0.1 = 0.567	3.58
	海泥中	(60.1-1.13) π × 0.8128 = 150.58	0.02	150.58 × 0.02 = 3.011	
②	潮位間	(1.5-0.25) π × 0.8128 = 3.19	(0.31)	3.19 × 0.31 = (1.0)	(7.4)
	海水中	(1.13+0.25) π × 0.8128 = 3.52	(0.97)	3.52 × 0.97 = (3.4)	
	海泥中	(60.1-1.13) π × 0.8128 = 150.58	(0.02)	150.58 × 0.02 = (3.011)	

()内は推定値

ケース①は、従来の方法((8)式による)で算出したもので、電流値は3.6(A)である。3.6(A)の値は、図-4.2では最小値に相当し、図-4.3では最小値以下である。ケース②は、現地の防食杭について測定した防食電流値から潮位間及び海水中の防食電流密度を逆算したものである(防食電位: -900mV)。表-4.4に示す現地の測定値から、潮位間の防食電流密度(初期値)は、 $0.3\sim 0.4\text{ A/m}^2$ と推定される。このことは、港湾鋼構造物に電気防食を適用するとき、潮位間について防食電流を算出することが必要であること、また、潮位間の被覆は防食電流の節減になること等を裏付ける。

5. 結 論

本実験の範囲から、次のことがいえる。

(1) 港湾鋼構造物にシミュレートしたマクロ試片では、干潮時に大気中に露出し満潮時に海水中に没した部位がマクロセルのカソード部となった。カソード部に流入したマクロ腐食電流は、満潮初期に最大となり経時とともに低減した。満潮初期の最大値は天候に左右された。

(2) マクロ試片に電気防食を適用したとき、防食電流はカソード部に優先的に流入した。カソード部(潮位間)に流入した防食電流密度は、アノード部(海水中、海泥中)に流入した値を上廻った。

(3) 干潮面直下部の防食率は、マイクロ腐食速度に対して95~96%、マクロ腐食速度に対して97~98%であった。更に、脱錆によりマクロ腐食速度が増大したとき、防食率は99%になった。このように、電気防食は、干

潮面直下部に発生した集中腐食の防止に有効であった。

(4) 現在、所要防食電流(所期値)は、海水中と海泥中について算出されているが、(2)のことから、潮位差の大きいところでは、潮位間についても防食電流の算出を行うことが望ましい。

(6) また、(2)のことから、潮位間の被覆は、防食電流の節減に有効である。

(6) 発錆鋼材に電気防食を適用したとき、さび層の還元電流が一時的に必要なであったため、所要防食電流量は増大した。

(7) 現地における通電試験では、潮位間に流入した防食電流密度(初期値)は、海水中の標準値(清浄海域)の3~4倍であった。

(1983年3月31日受付)

謝 辞

現地における通電試験の実施について、運輸省第二港湾建設局・横浜調査設計事務所、京浜港工事事務所の関係各位にご協力をいただいた。ここに、厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 善 一章: 港湾における既設鋼構造物の腐食に関する研究, 港研報告, Vol. 12, No. 1, 1973年, pp. 141~194.
- 2) C.R. Southwell, J.D. Bultman and A.L. Alexander: Corrosion of Metals in Tropical Environments-Final Report of 16-Year Exposures, Materials Performance, Vol. 15, No. 7, 9~25, 1976.

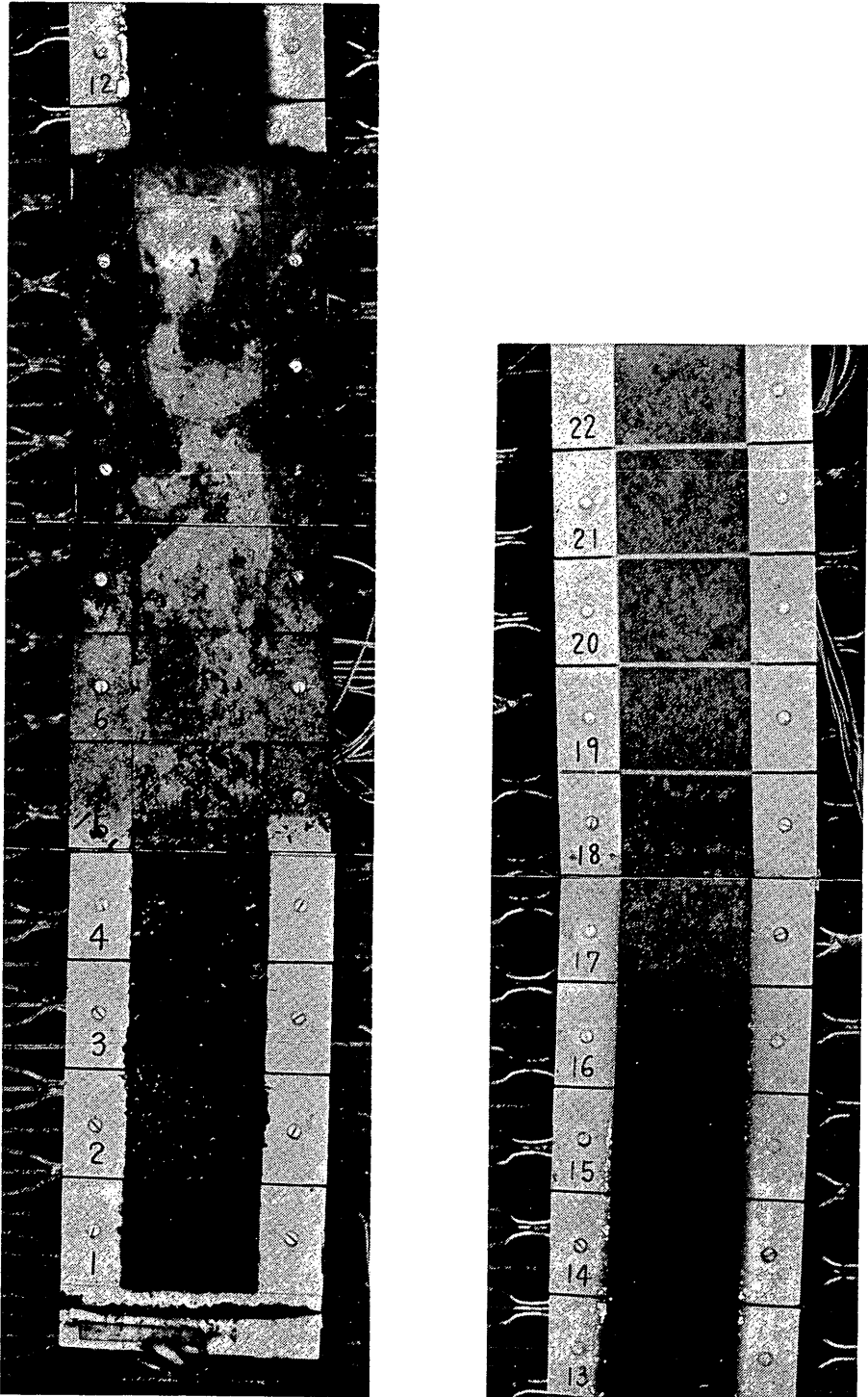


写真-1 ミクロ試片回収時の発錆状況 (実験1, 161日後)

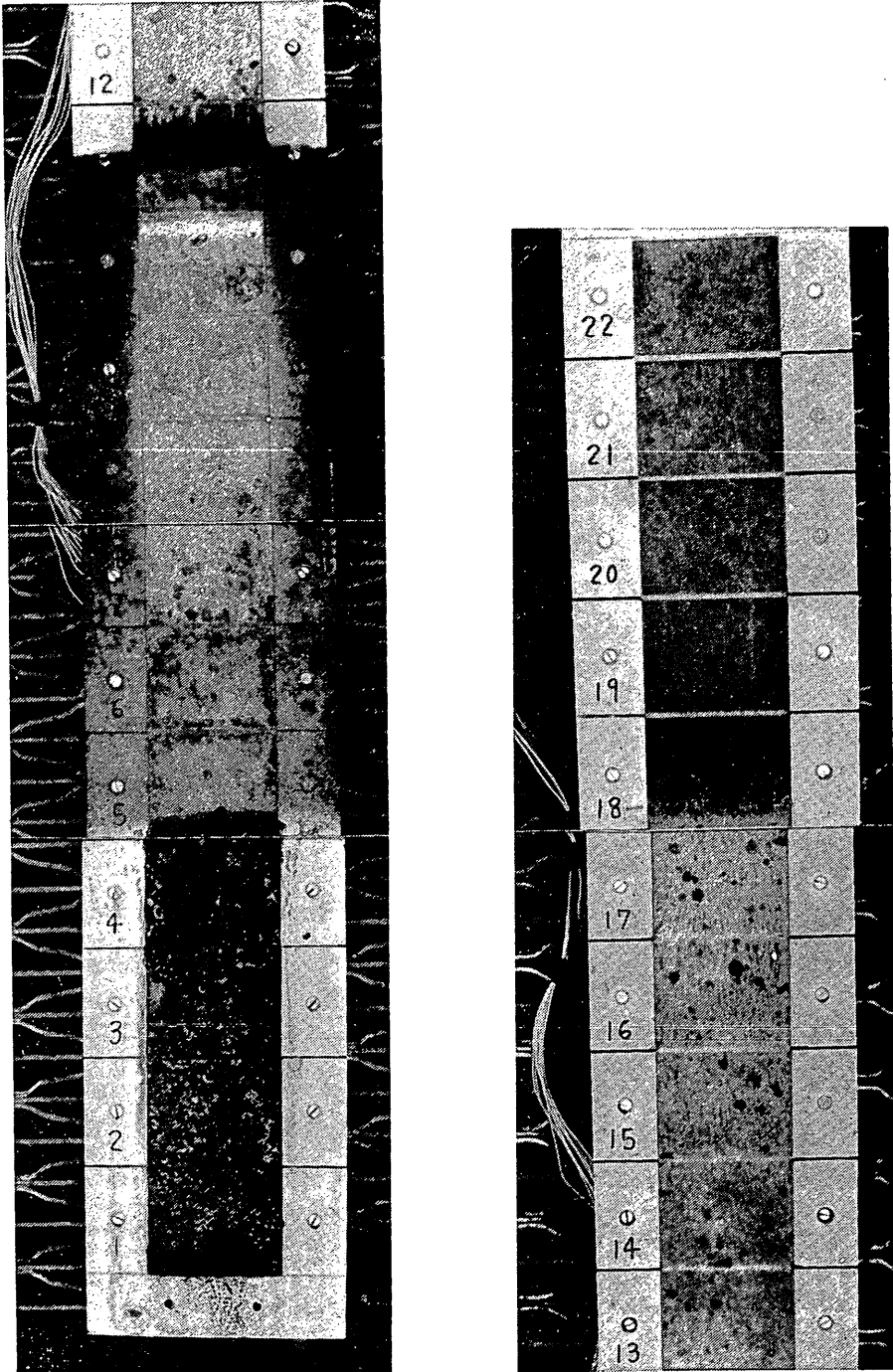


写真-2 マクロ試片回収時の発錆状況（実験1，161日後）

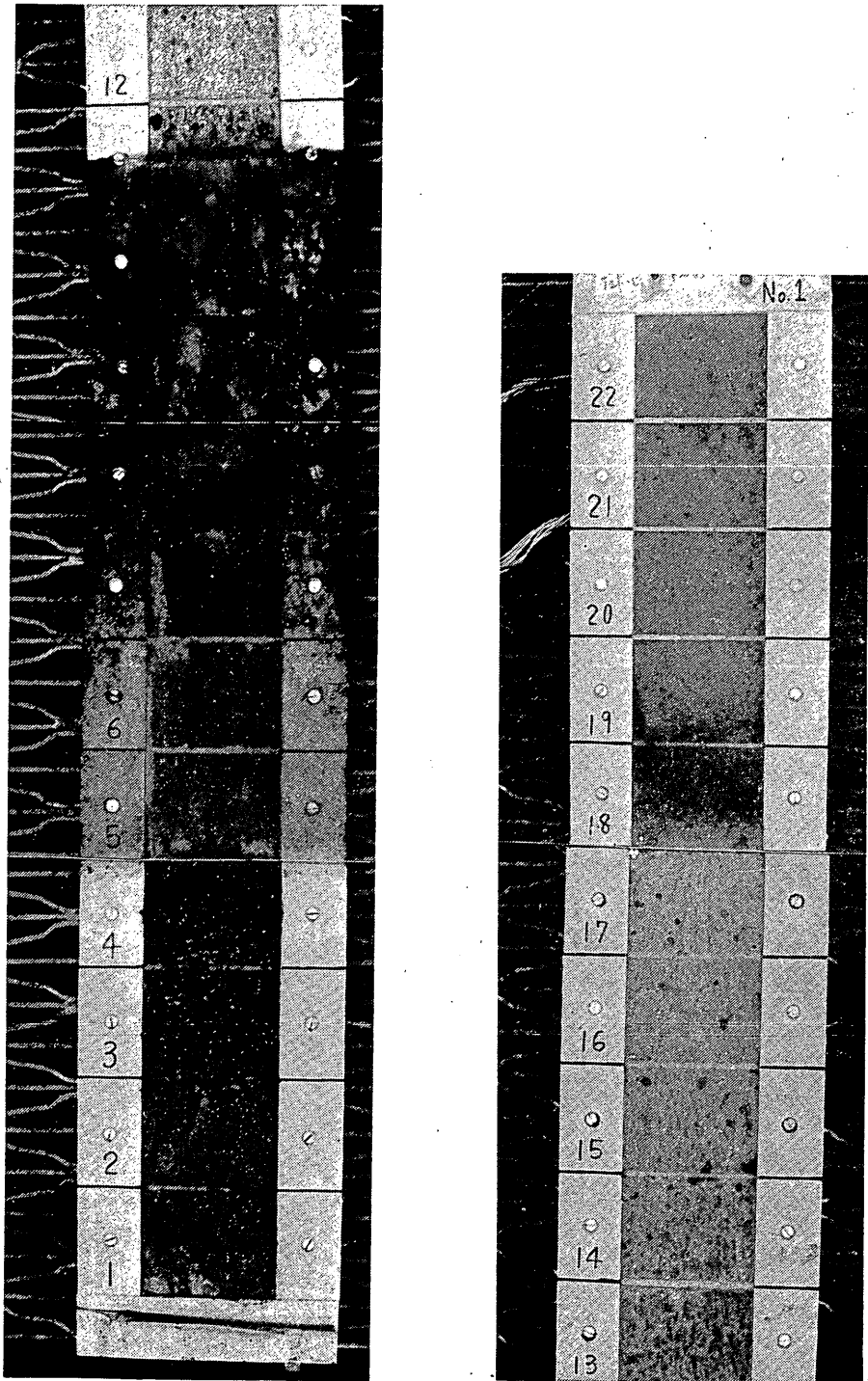


写真-3 電防試片回収時の発錆状況 (実験 1, 161日後) (-780mV)

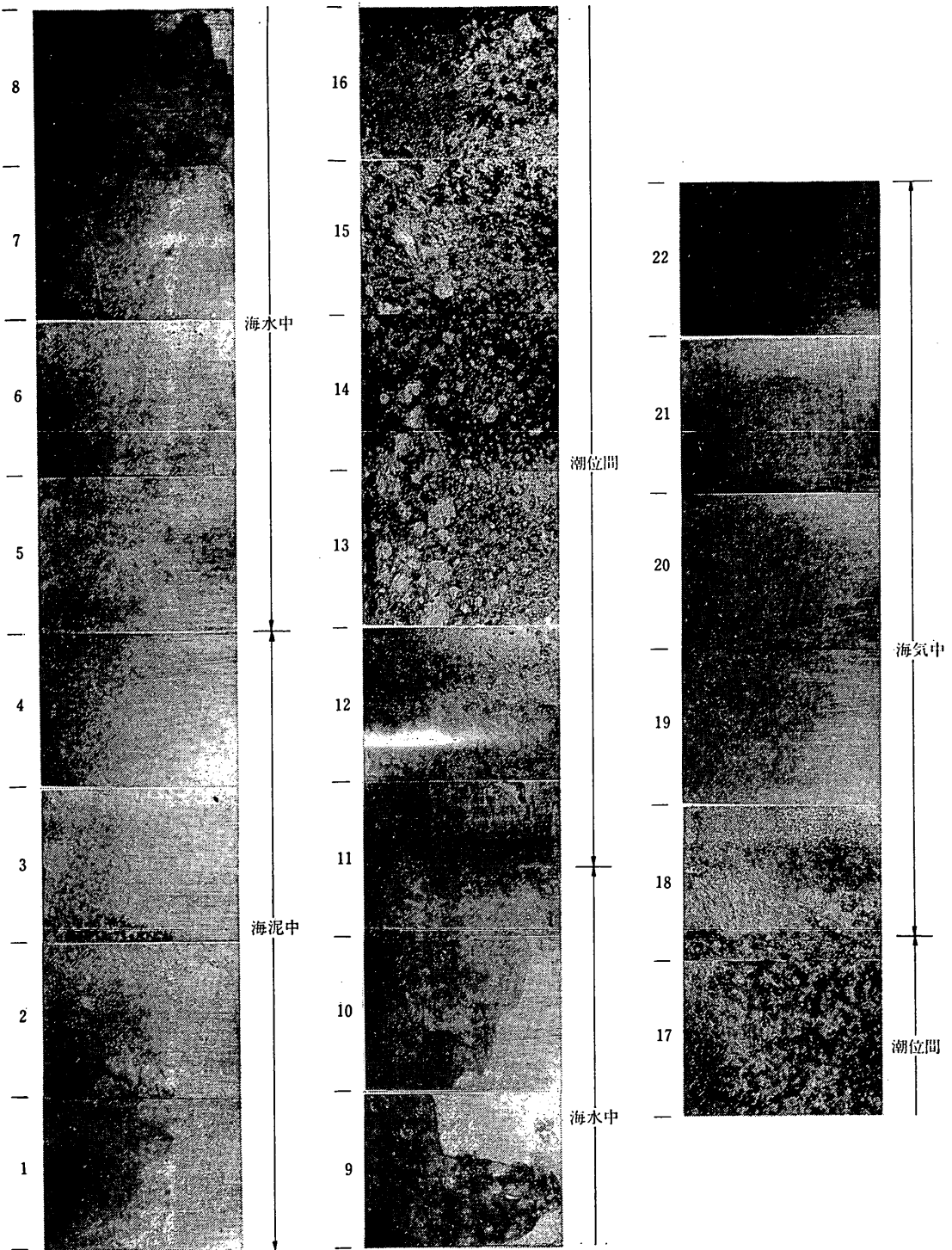


写真-4 ミクロ試片の脱錆後の表面状況 (実験1)

集中腐食に対する電気防食の適用性

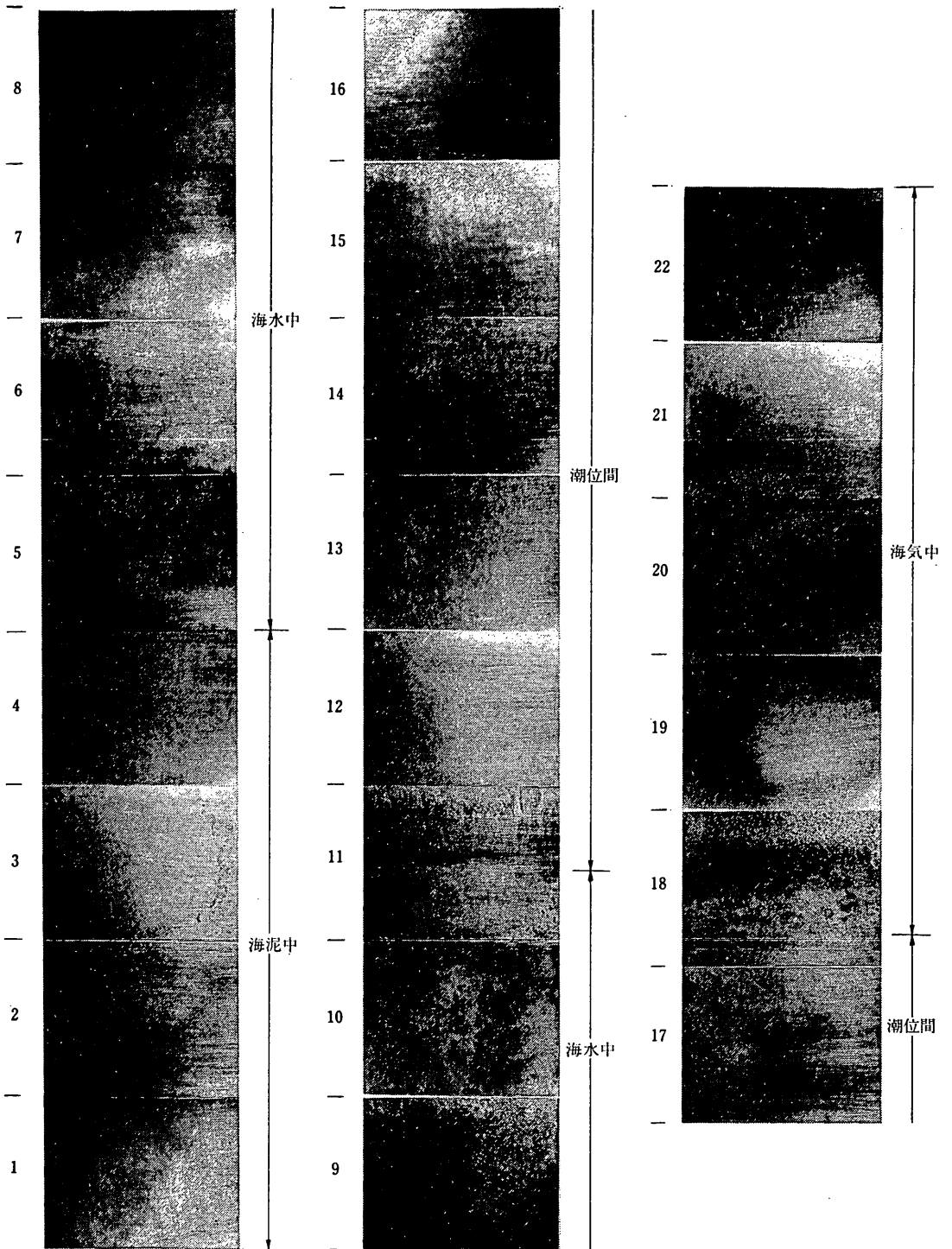


写真-5 マクロ試片の脱錆後の表面状況 (実験1)

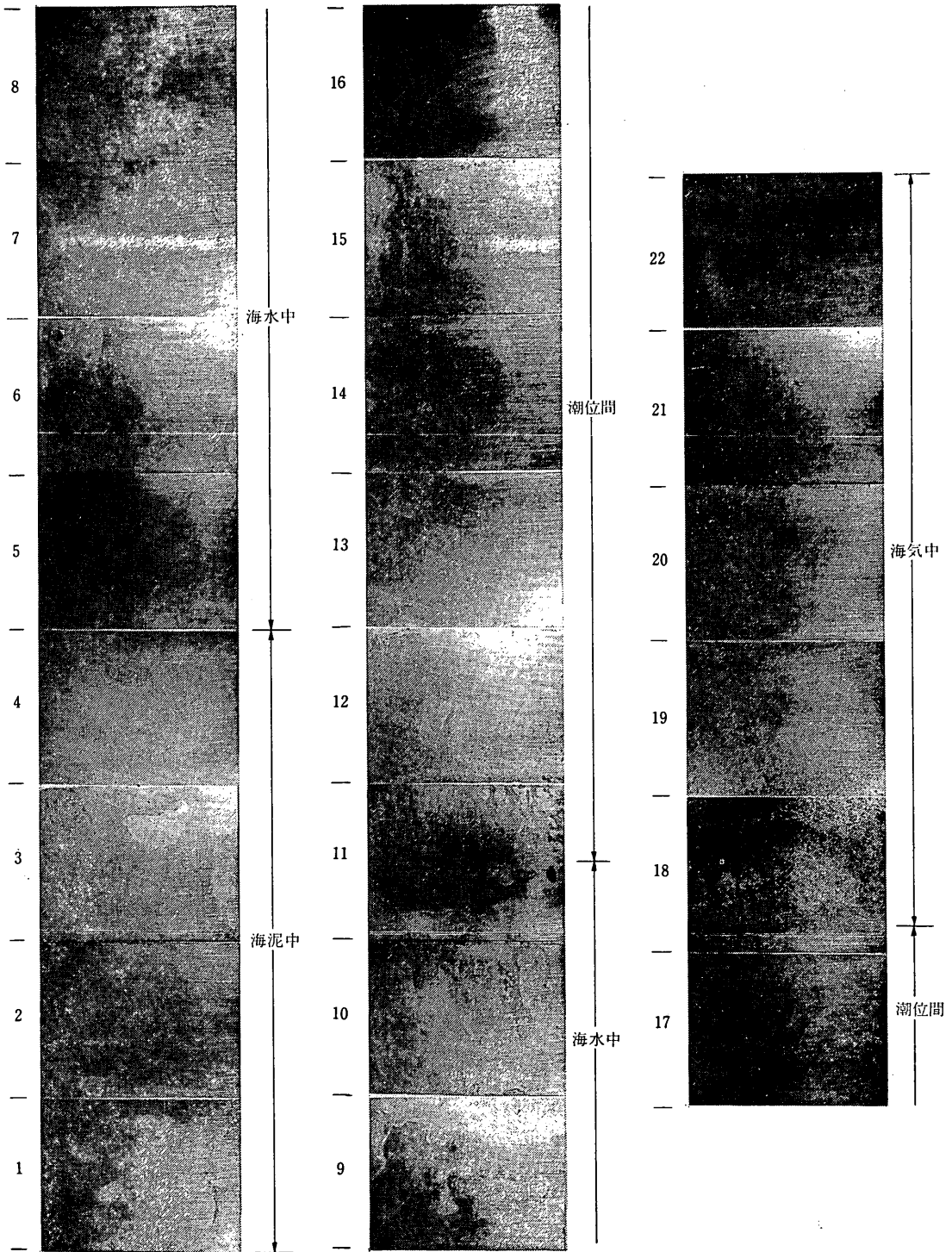


写真-6 電防試片の脱錆後の表面状況 (実験1)

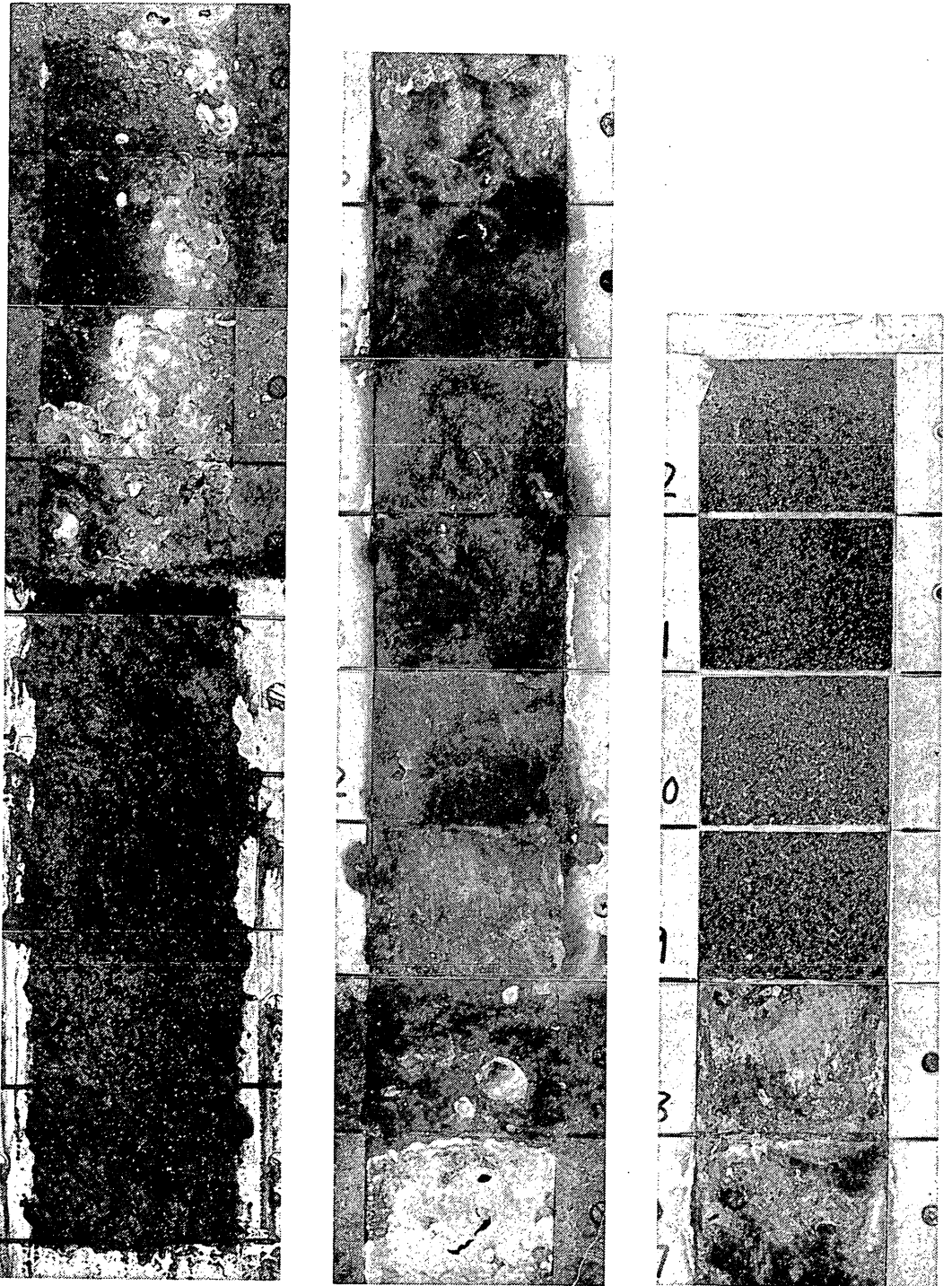


写真-7 ミクロ試片回収時の発錆状況（実験2，514日後）

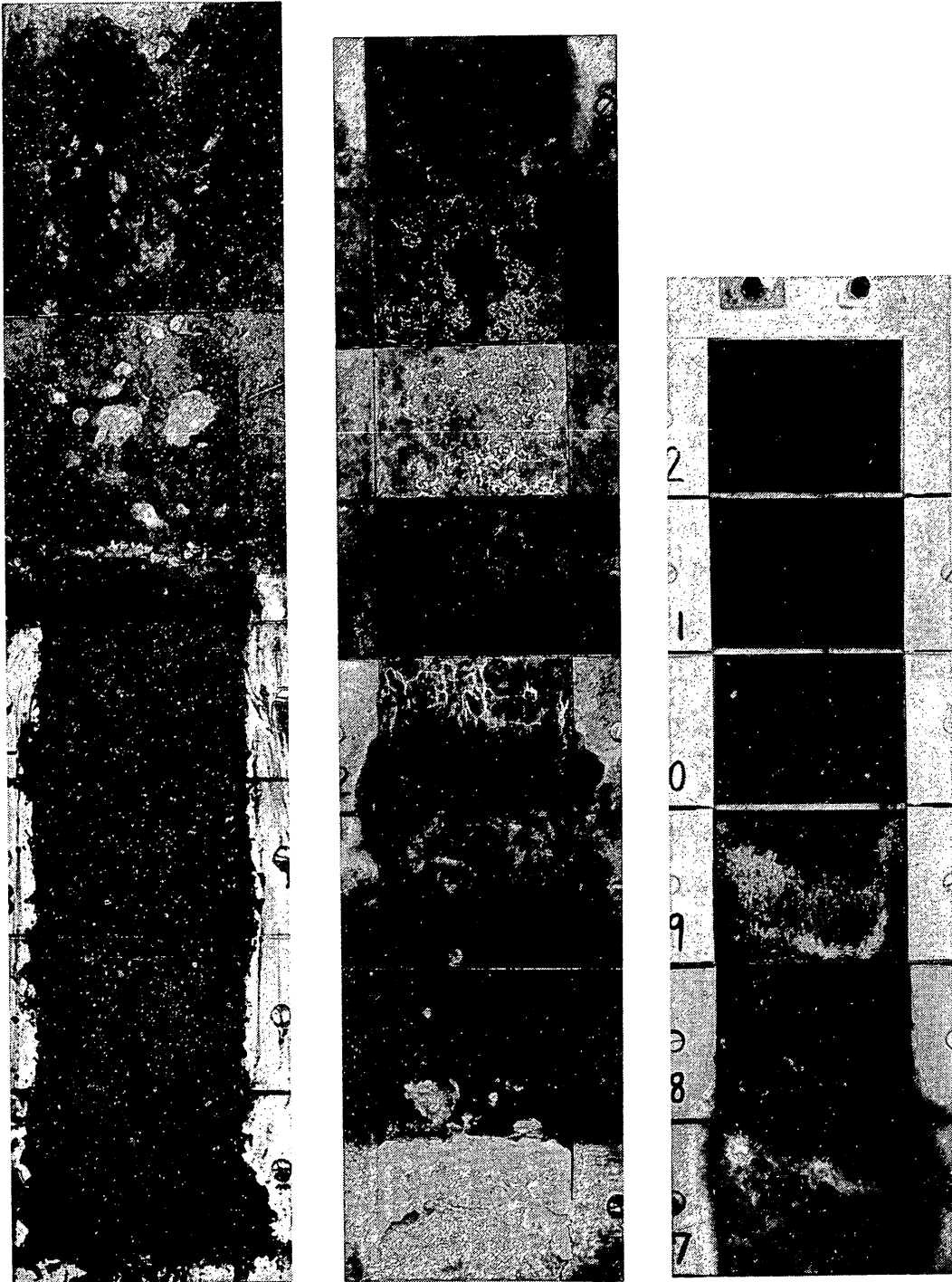


写真-8 マクロ試片回収時の発錆状況（実験2，514日後）

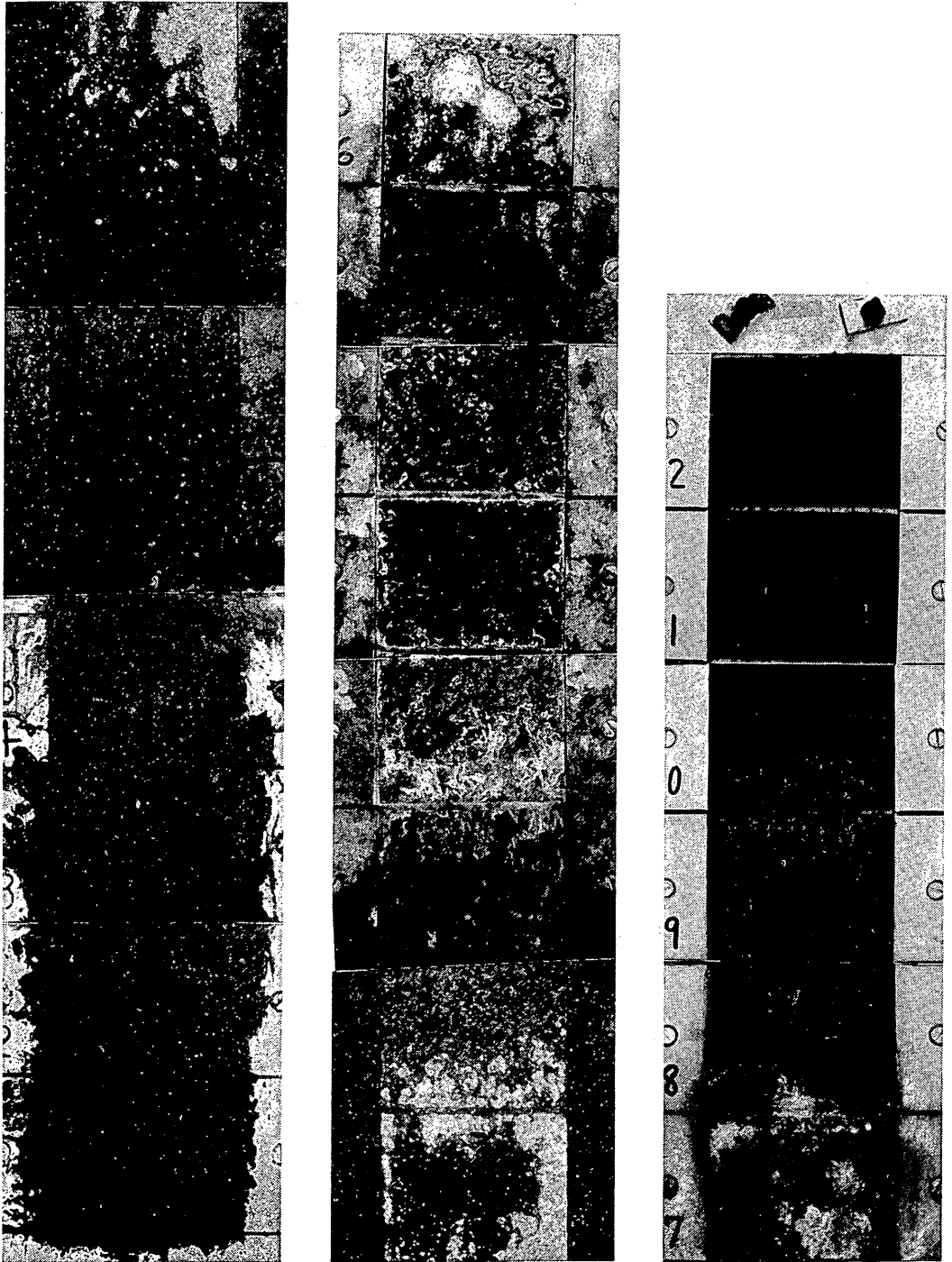


写真-9 電防用試片回収時の発錆状況（実験2，514日後）（-900 mV）

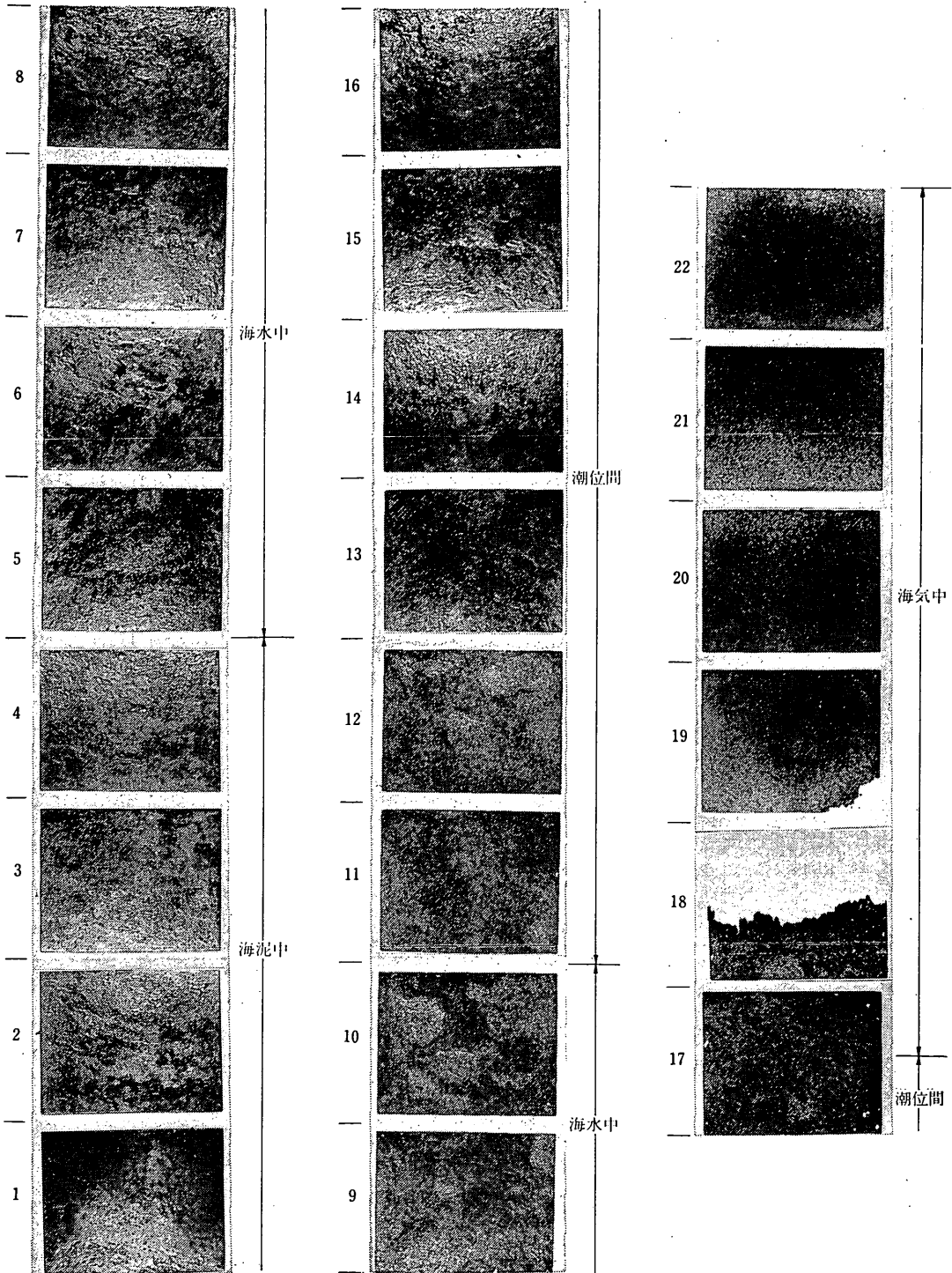


写真-10 ミクロ試片の脱錆後の表面状況 (実験2)

集中腐食に対する電気防食の適用性

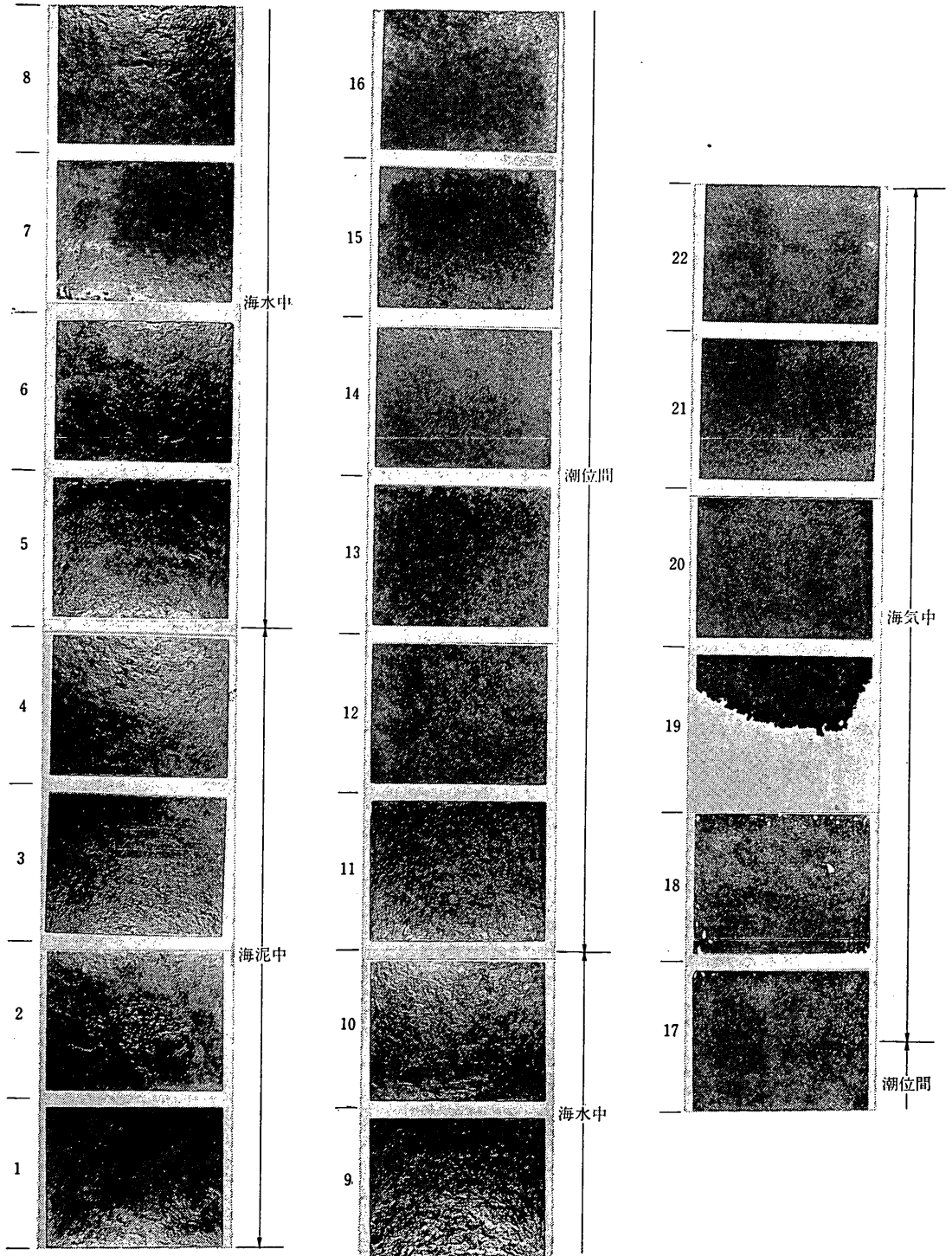


写真-11 マクロ試片の脱錆後の表面状況 (実験 2)

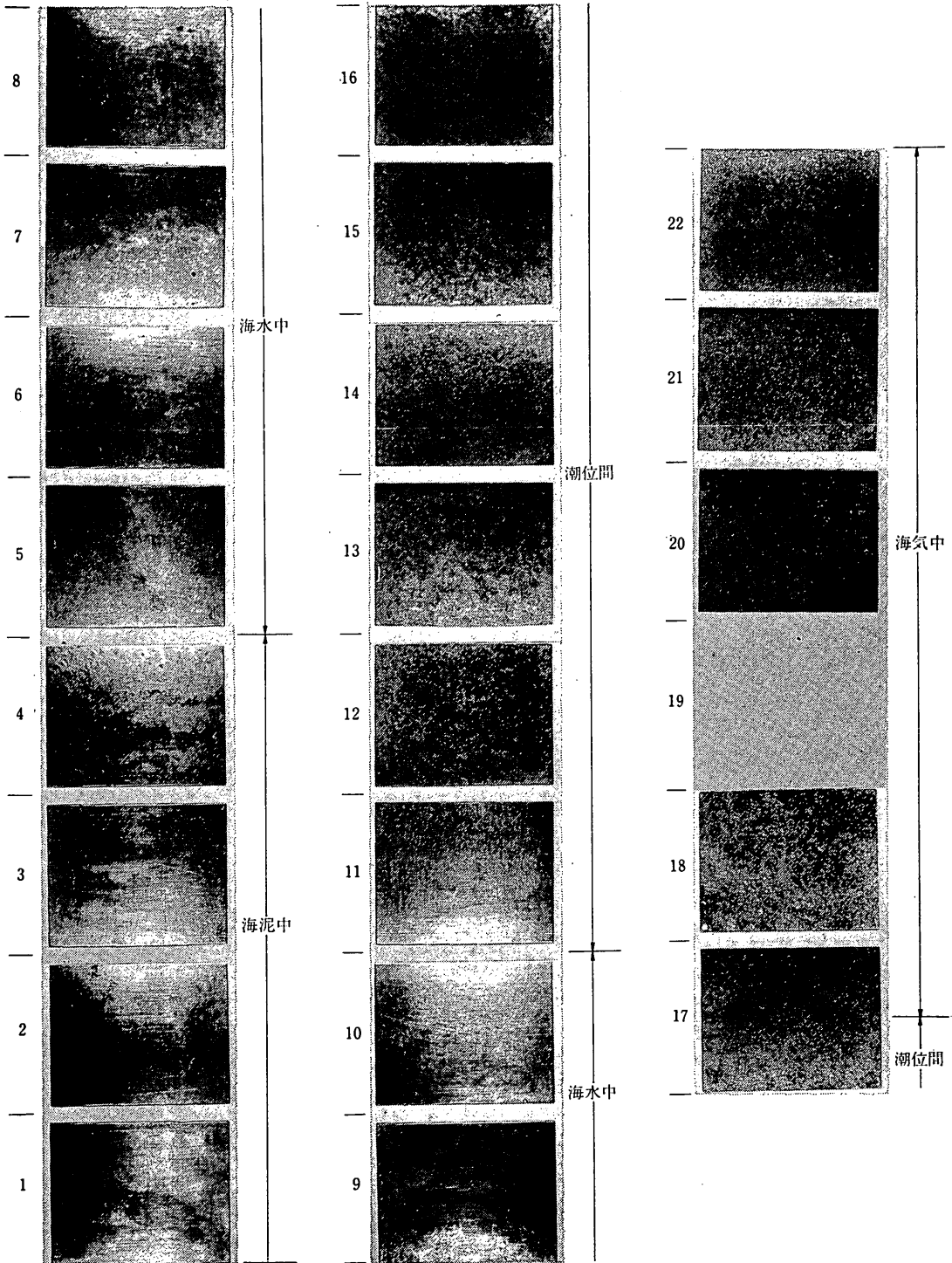
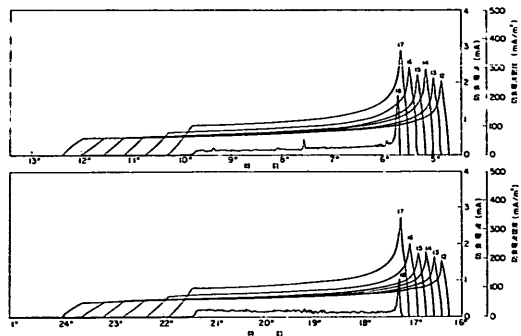
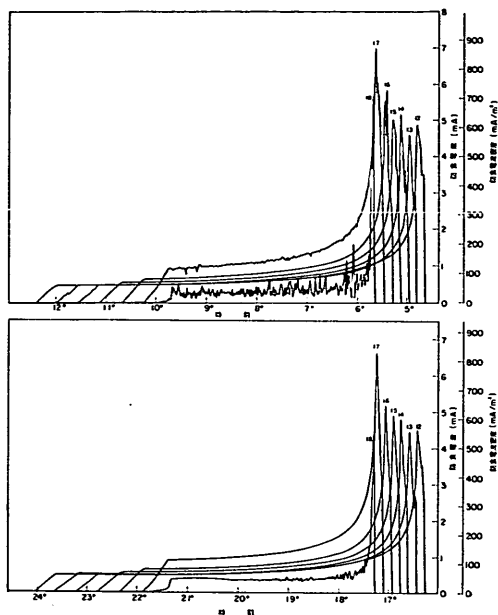


写真-12 電防試片の脱錆後の表面状況 (実験 2)

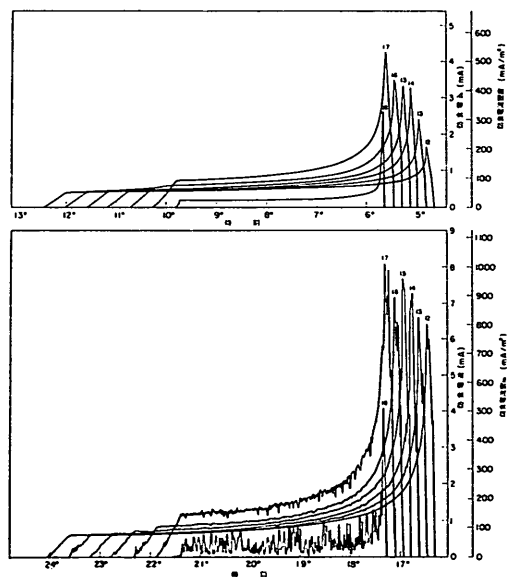
集中腐食に対する電気防食の適用性



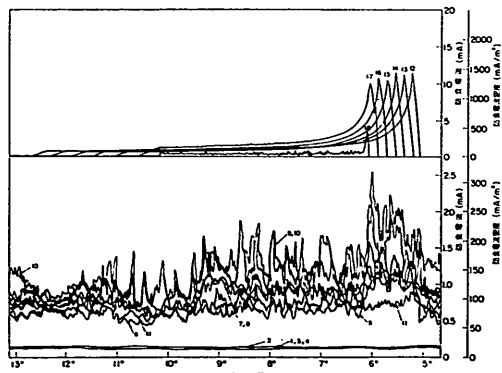
付図-3.1.1 防食電流の経時変化 (実験 1, 51日目, 雨天)



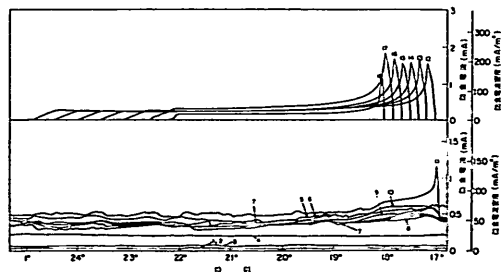
付図-3.1.3 防食電流の経時変化 (実験 1, 53日目, 晴天, 強風)



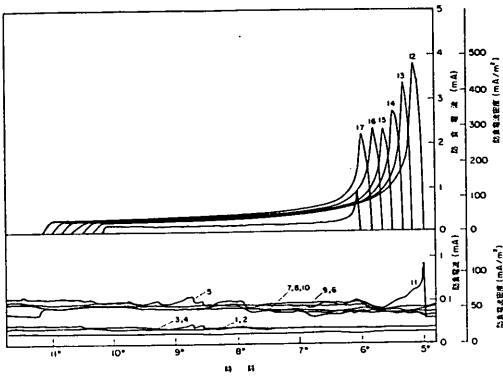
付図-3.1.2 防食電流の経時変化 (実験 1, 52日目, 晴天)



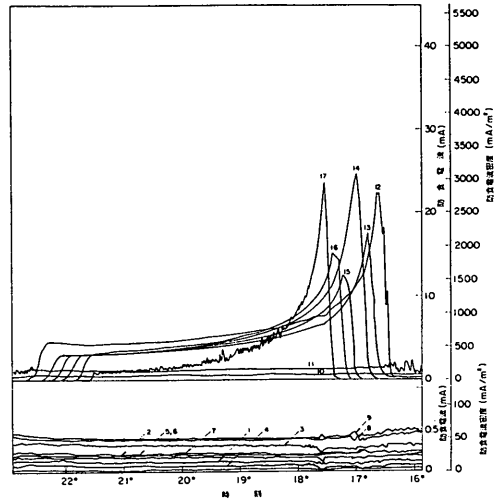
付図-3.1.4 防食電流の潮位による変動 (実験 1, 初期: 10日目)



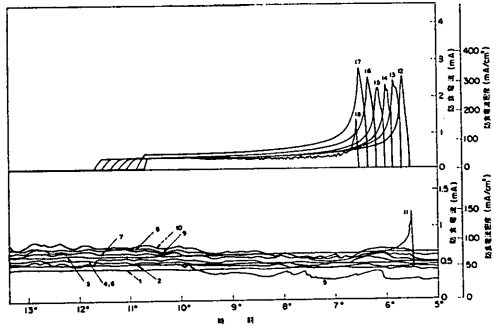
付図-3.1.5 防食電流の潮位による変動 (実験 1, 中期: 100日目)



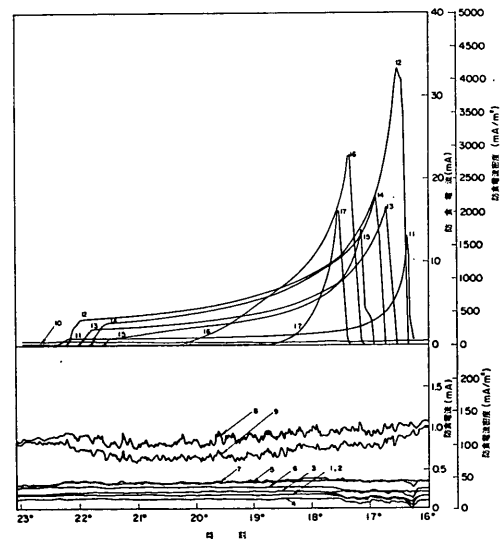
付図-3.1.6 防食電流の潮位による変動 (実験 1, 終期: 155 日目)



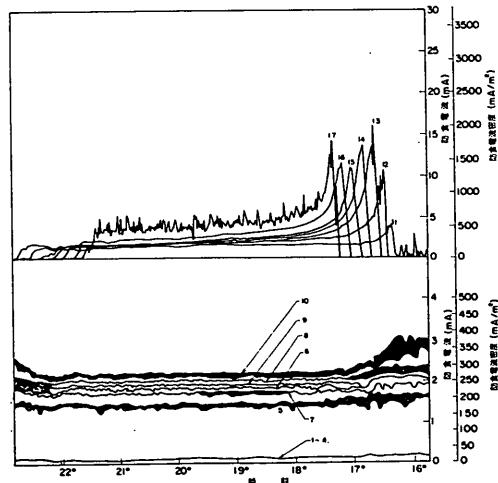
付図-3.1.9 防食電流の潮位による変動 (実験 2, 中期: 302 日目)



付図-3.1.7 防食電流の潮位による変動 (実験 1, 終期: 160 日目, -900 mV)

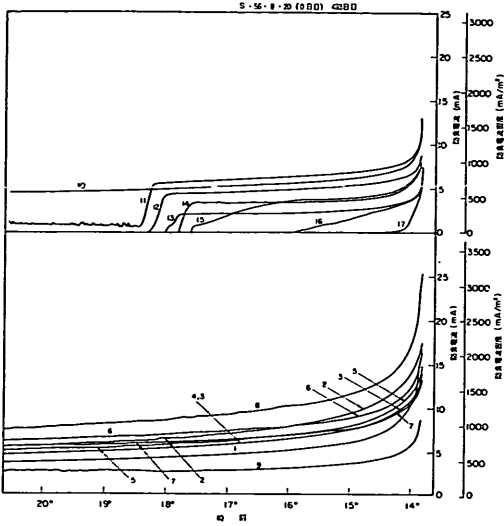


付図-3.1.10 防食電流の潮位による変動 (実験 2, 終期: 471 日目)

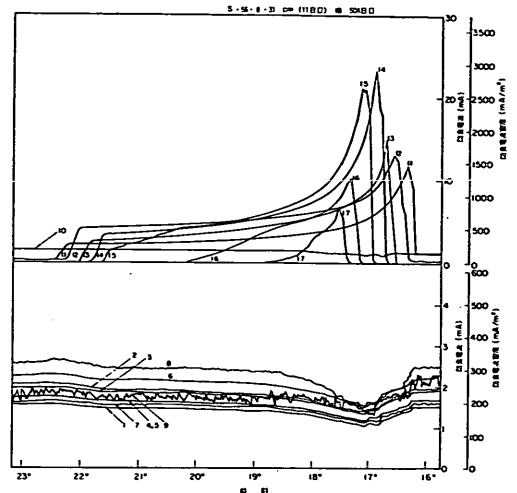


付図-3.1.8 防食電流の潮位による変動 (実験 2, 初期: 4 日目)

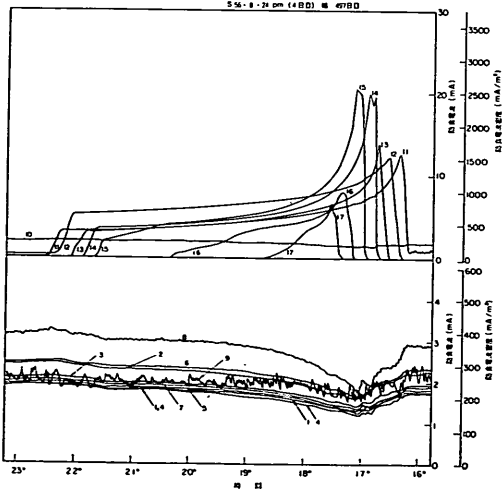
集中腐食に対する電気防食の適用性



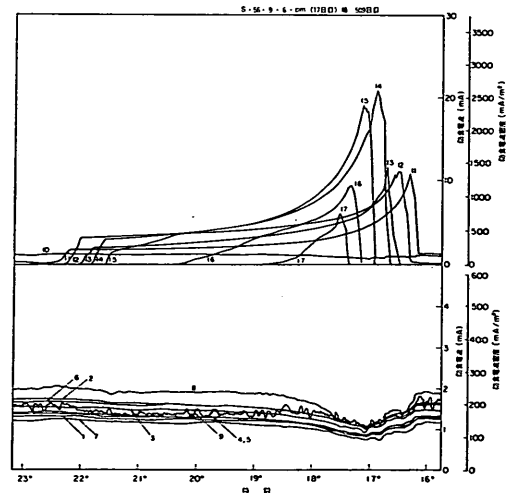
付図-3.1.11 発錆マクロ試片に流入した防食電流の経時変化 (実験2, 通電初日)



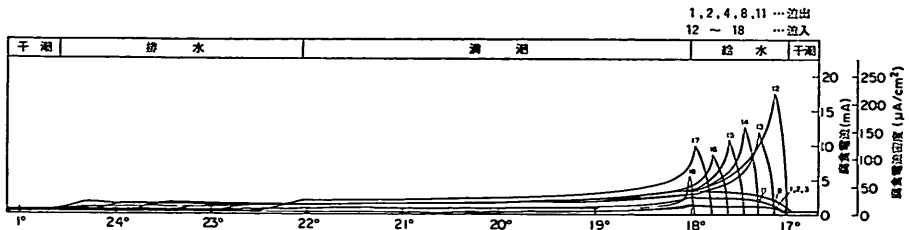
付図-3.1.13 発錆マクロ試片に流入した防食電流の経日変化 (実験2, 通電11日目)



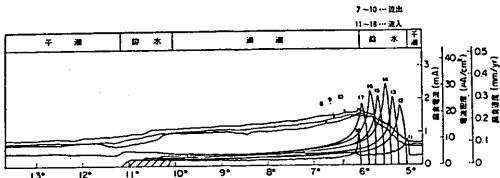
付図-3.1.12 発錆マクロ試片に流入した防食電流の経日変化 (実験2, 通電4日目)



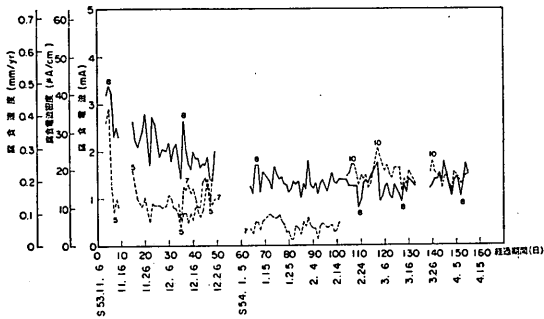
付図-3.1.14 発錆マクロ試片に流入した防食電流の経日変化 (実験2, 通電17日目)



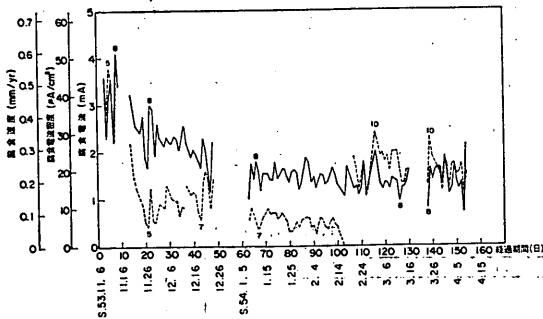
付図-3.2.1 腐食電流の潮位による変動 (実験1, 初期: 9日目)



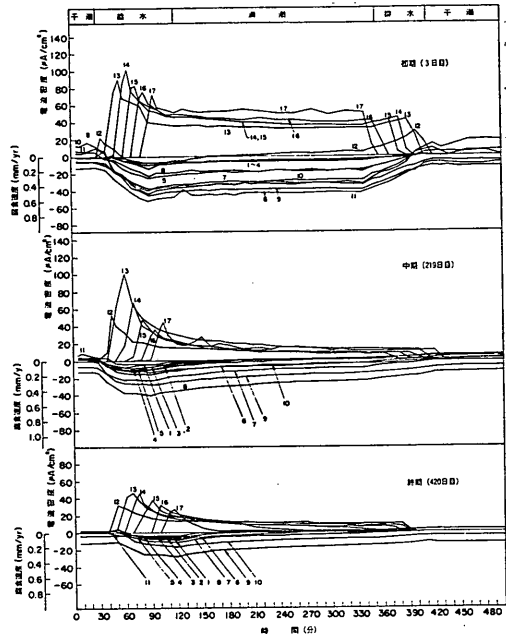
付図-3.2.2 腐食電流の潮位による変動
(実験1, 終期: 155日目)



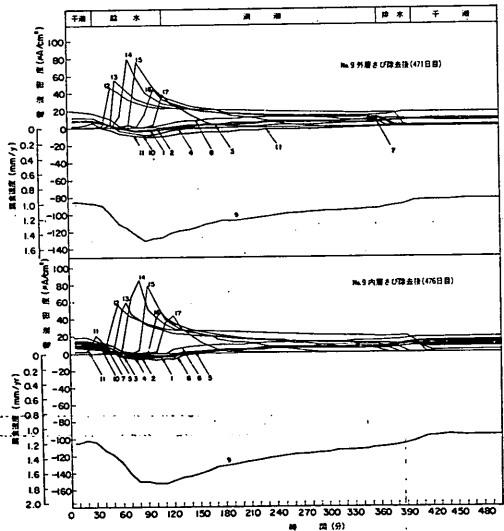
付図-3.2.3 マクロ腐食電流の経日変化(実験1,
満潮初(午前5時)の最大値)



付図-3.2.4 マクロ腐食電流の経日変化(実験1,
満潮初(午後5時)の最大値)

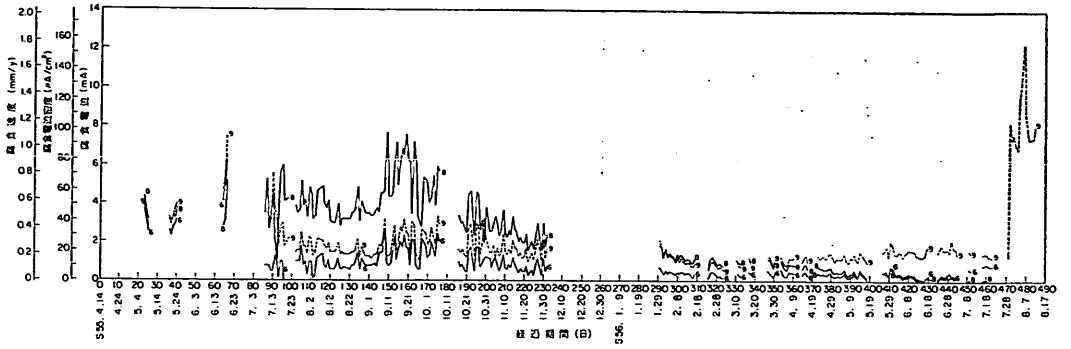


付図-3.2.5 潮位変動によるマクロ腐食電流
変化(実験2)

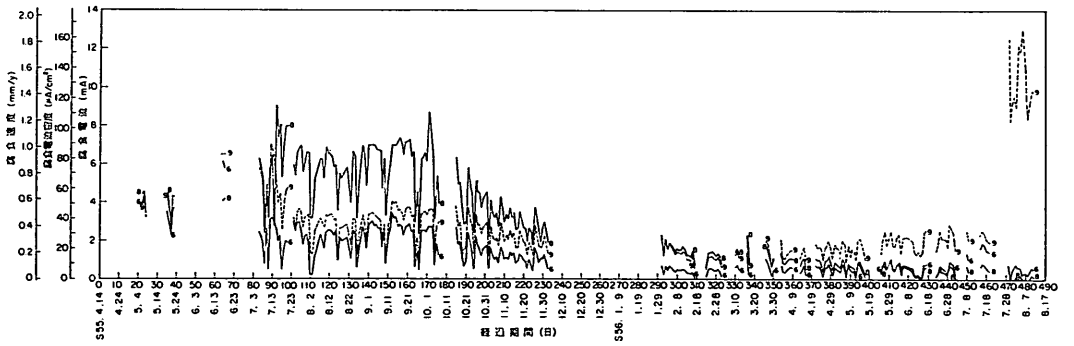


付図-3.2.6 潮位変動によるマクロ腐食電流変化
(実験2, 試片 No. 9の脱錆後)

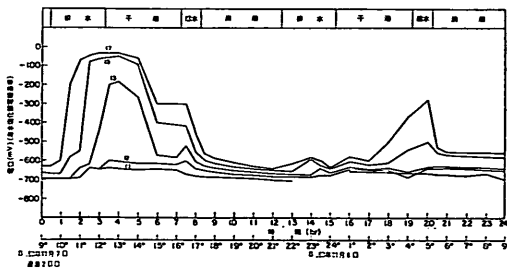
集中腐食に対する電気防食の適用性



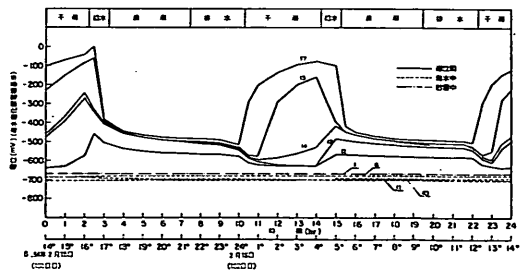
付図-3.2.7 マクロ腐食電流の経日変化 (実験2, 満潮初 (午前5時) の最大値)



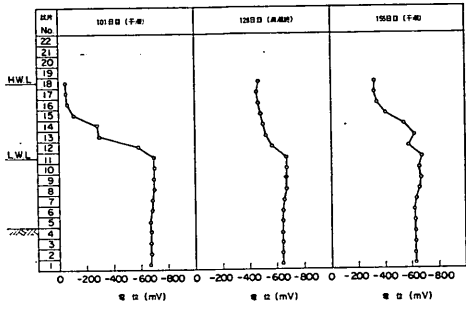
付図-3.2.8 マクロ腐食電流の経日変化 (実験2, 満潮初 (午後5時) の最大値)



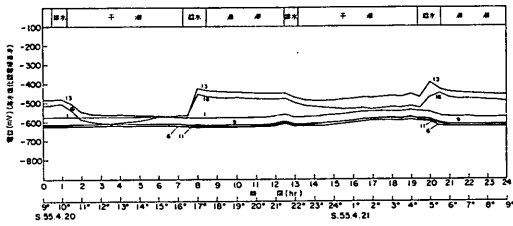
付図-3.3.1 潮位変動によるマイクロ試片の電位変化 (実験1, 初期: 2日目~3日目)



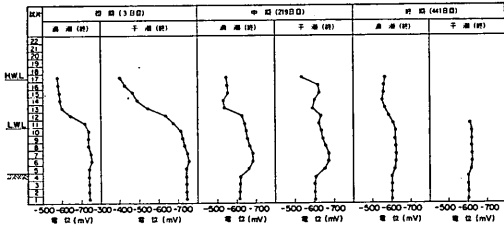
付図-3.3.2 潮位変動によるマイクロ試片の電位変化 (実験1, 中期: 101日目~102日目)



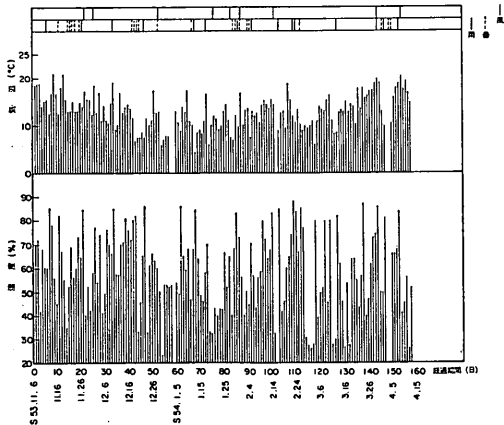
付図-3.3.3 ミクロ試片の電位測定結果 (実験1, 海水塩化銀電極基準)



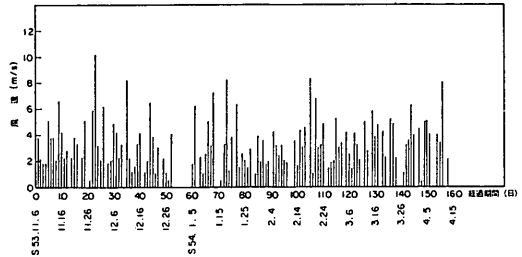
付図-3.3.4 潮位変動によるミクロ試片の電位変化 (実験2, 371日目~372日目)



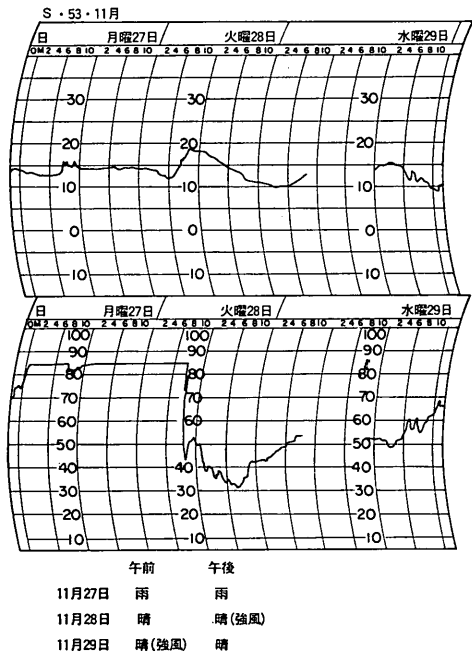
付図-3.3.5 ミクロ試片の電位測定結果 (実験2, 海水塩化銀電極基準)



付図-3.8.1 満潮時 (初) (17時) の気象状況 (実験1)

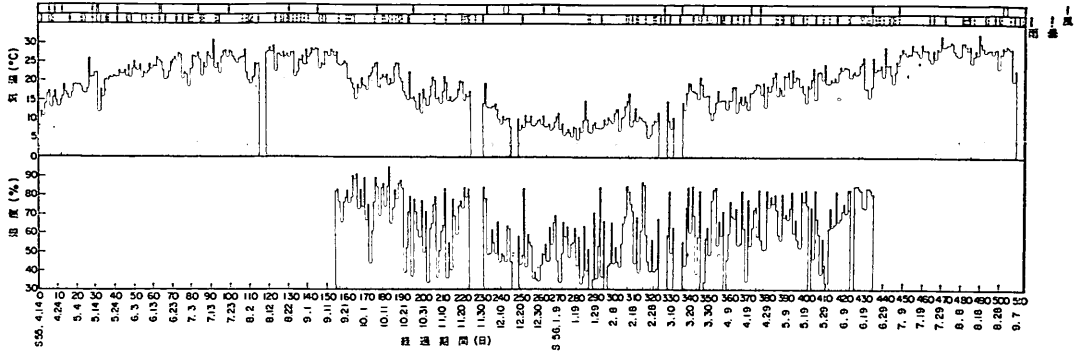


付図-3.8.2 風速測定値 (10時測定) (実験1)

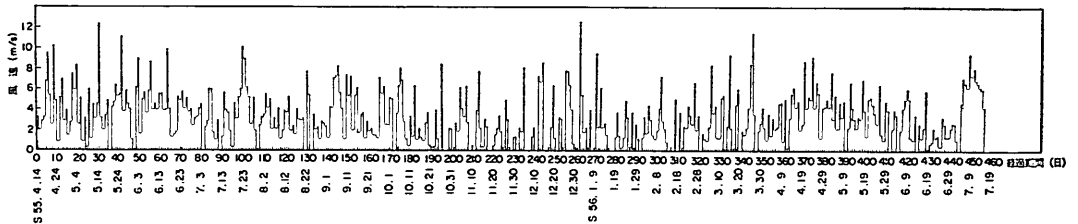


付図-3.8.3 気温および湿度の測定データ例 (実験1)

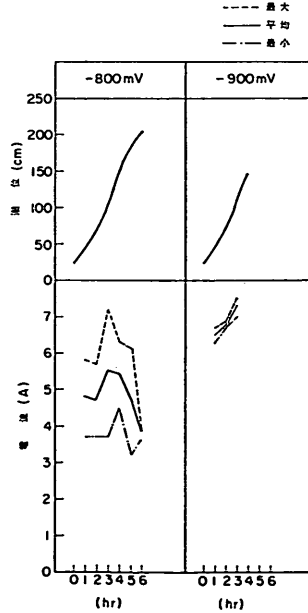
集中腐食に対する電気防食の適用性



付図-3.8.4 満潮時(初)(17時)の気象状況(実験2)



付図-3.8.5 風速測定値(10時測定)(実験2)



付図-4.1 潮位変動に伴う防食電流変化測定例

付表-3.6.1 試験片 No. 10 と各試験片間の抵抗測定結果 (実験1)

試験片		抵抗 (Ω)							
No.	環境	腐食用単独片				腐食用短絡片	電防用短絡片		
		186日目-9°38'	239日目-9°56'	368日目-9°21'	441日目-9°30'	490日目-9°05'	490日目-9°14'	490日目-9°22'	
17	潮位間	2980	94	168	3840	11.5	18.3	11.3	
16		1180	76	98	1027	12.2	16.0	9.5	
15		489	71	117	595	14.0	10.4	18.0	
14		131	79	124	555	13.4	10.4	13.0	
13		104	78	116	457	15.3	14.9	13.3	
12		55	54	48	287	10.7	11.2	8.1	
11		13	22	30	107	5.8	7.2	5.6	
10		海水中	19	11	17	9	4.1	5.5	5.0
9			27	21	25	12	4.5	6.4	5.6
8			33	29	23	37	4.7	6.6	6.4
7	34		32	21	20	4.6	6.7	6.9	
6	32		15	19	26	5.0	7.0	7.1	
5	31		32	39	144	6.4	8.1	7.8	
4	31		32	39	145	6.8	8.5	8.4	
3	32		33	40	148	7.3	8.1	9.2	
2	32		32	39	153	7.7	9.2	10.0	
1	32		32	39	153	7.7	9.2	10.0	

付表-3.6.2 試験片 No. 10 と各試験片間の抵抗測定結果 (実験2)

試験片		抵抗 (Ω)						
No.	環境	腐食用単独片				腐食用短絡片	電防用短絡片	
		101日目-15°44'	155日目-10°15'	155日目-14°38'	156日目-9°02'	156日目-9°12'	157日目-9°02'	
18	潮位間	9.4×10^6	7180	7.6×10^6	110.4	146.4	478.0	
17		10×10^6	3460	7.4×10^6	34.8	33.8	252.0	
16		8×10^6	1630	5.4×10^6	31.9	30.6	184.2	
15		4.5×10^6	1620	2.4×10^6	29.6	29.1	148.6	
14		1.4×10^6	459	4.3×10^5	23.4	30.0	146.4	
13		1.3×10^6	13.0	3.9×10^5	20.0	28.4	138.6	
12		9.8×10^3	11.2	1320	3.5	22.2	139.0	
11		44.3	38.6	46.2	39.2	6.3	42.0	
10		海水中	48.2	28.1	28.4	27.6	60.4	38.4
9			52.4	21.9	24.6	23.6	29.2	50.0
8	56.8		14.8	14.8	14.4	13.9	30.4	
7	56.2		8.4	7.1	7.8	9.1	112.0	
6	53.7		9.6	10.6	11.2	10.2	100.0	
5	59.4		11.2	10.7	12.0	10.1	98.0	
4	62.8		11.6	10.9	12.4	10.2	76.0	
3	67.4		12.0	10.8	12.8	10.4	72.0	
2	68.9		50.5	11.1	13.9	12.6	66.0	
1	68.9		50.5	11.1	13.9	12.6	66.0	

集中腐食に対する電気防食の適用性

付表-3.8.1 海水の水質分析結果

採水年月日	水深 (m)	比重 (20°C)	pH (20°C)	濁度	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)
S.53.11.8	-0.5	1.019	7.80	1以下	7350	285	293	970	14616	2052	126
	-2.0	1.020	7.70	1以下	7500	290	299	995	14910	2096	123
S.54.3.1	-0.5	1.024	7.65	1以下	9150	340	369	1191	17522	2456	116
	-2.0	1.024	7.70	1以下	9450	350	368	1190	18112	2545	122
S.54.8.11	-0.5	1.022	7.80	1以下	9300	340	372	1197	17859	2500	120
	-2.0	1.023	7.80	1以下	9750	350	387	1237	18575	2584	112
S.55.6.12	-0.5	1.022	7.80	1以下	8250	315	331	1060	15774	2160	116
	-2.0	1.022	7.80	1以下	8250	330	339	1109	16490	2272	112
S.55.8.11	-0.5	1.022	7.86	1以下	9000	335	364	1176	17480	2445	97
	-2.0	1.023	7.80	1以下	9150	345	364	1193	17943	2483	110
S.56.1.19	-0.5	1.026	7.72	1以下	9600	325	381	1249	18364	2594	125
	-2.0	1.026	7.68	1以下	9600	325	377	1252	18617	2591	121
S.56.6.8	-0.5	1.018	7.72	1以下	7650	262	302	1001	15205	2094	113
	-2.0	1.018	7.78	1以下	7800	270	311	1034	15521	2164	104
S.56.9.4	-0.5	1.020	7.40	1以下	8175	315	331	1071	17082	2210	117
	-2.0	1.022	7.67	1以下	8775	330	352	1166	17720	2398	102
海水の成分例 [※]					10556	380	400	1272	18980	2649	

※金属防蝕技術便覧(1972) p.177