

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 365 Dec. 1980

港湾構造物の所要防食電流に関する調査

善 一 章
阿 部 正 美

運輸省港湾技術研究所



目 次

1	まえがき	3
2	調査構造物	3
3	陽極調査	4
3.1	調査方法	4
3.2	陽極の閉路電位測定	6
3.3	陽極の発生電流測定	10
3.4	陽極の重量測定	12
3.5	陽極の観察	14
4	構造物調査	16
4.1	調査方法	16
4.2	構造物の電位測定	18
4.3	構造物の肉厚測定	18
4.4	通電試験	18
4.5	構造物の水深測定及び観察	22
5	環境調査	22
5.1	調査方法	22
5.2	水質試験	23
5.3	底質試験	26
6	結 論	27
	あとがき	29
	参考文献	29
	写 真	
	付 図	
	付 表	

港湾構造物の所要防食電流に関する調査

善 一 章*
阿 部 正 美**

要 旨

港湾構造物の海中部の防食には、一般に電気防食が適用されている。電気防食のタイプとしては、最近、流電陽極方式が主であるが、流電陽極方式では陽極寿命が不足した経験例がある。したがって、所要防食電流密度の適正值及び所要防食電流密度に影響する環境要因を知る目的で本調査を実施した。A～J港の調査構造物10例は代表的環境から選ばれたもので、電防期間は6年以上であり、構造物の所在地は北海道から九州に及ぶ。調査は陽極調査、構造物調査、環境調査よりなり、主な調査結果は次のとおりである。

- (1) B、E港では防食電流密度は初期値の50%以上であり、この結果陽極寿命の不足が推定された。一方、A、J港等では防食電流密度は初期値の10～30%まで減少した
- (2) B、E港では、調査他港に比べて海水中の溶存酸素量が少なく、水温が高く、アンモニウムイオン量が多く、酸化還元電位が低く、海泥中の硫酸塩還元菌菌体数が多い傾向がみられた。
- (3) B、E港では、所要防食電流密度（初期）を設計値より引上げる必要がある。電防設計の目安からみて妥当な値は130～140 mA/m²程度と推定される。
- (4) A、J港等では、陽極表面は比較的平滑であり、また、流速の防食電流密度に及ぼす影響はあまりなかった。

1. まえがき

港湾構造物のMSL下の防食には、一般に電気防食が適用されている。電気防食法には外部電源陽極方式と流電陽極方式があり、港湾構造物に対してはAl合金陽極を使用する流電陽極方式が広く適用されている。電気防食の設計手順の一つに所要防食電流密度（初期）の選定がある。一般には、初期値として海水中では100 mA/m²が示されている¹⁾。所要防食電流密度は経年とともに減少し、3～4年後に初期値の約半分の値に落ち着くといわれる。陽極寿命がこの仮定に基づいて算出されるとき、経年変化後の安定値が初期値1/2以上では陽極寿命を下廻ることになり、反対に安定値が初期値の1/2以下では陽極寿命は設計寿命を上廻ることになる。環境条件と防食電流密度の関連として、自然海水でないところでは防食電流密度が不足すると経験的にいわれることがあるがあまり明確ではない。従って長期間経過した電防構造物の代表

例について調査を実施して、所要防食電流密度の適正值及び所要防食電流密度に影響する要因を検討した。調査は昭和54年度に行われた。なお、調査は港湾技術研究所の仕様書に準拠して中川防蝕工業KKと日本防蝕工業KKが5港づつ担当した。

2. 調査構造物

防食電流密度の安定値を測定するためには、構造物の電防期間は5年以上が望まれる(付図-11参照)。所要防食電流密度は、水温、流速、溶存酸素濃度などの増大や硫酸塩還元菌の繁殖などによって鋼材面の復極性が增大するときに大きくなるといわれている。したがって地域、水質、流速の観点から調査構造物10例を表-1のように選定した。調査構造物の環境、流速の分類は、次の通りである。なお、選定時の環境の判定は定性的であり、定量的な判定は5.環境調査の結果を参照する必要がある(図-11参照)。

* 構造部 主任研究官
** 構造部 材料施工研究室

表一 1 電気防食調査構造物

港名	鋼材			H.W.L (m)	水深 ¹⁾ (m)	防食面積(m ²) ¹⁾		Al 合金陽極 ¹⁾			塗装	経過期 間 年	電防期 間 年
	タイプ	t(mm)	ℓ(m)			海中	泥中	個数	A/個	年			
A	YSPZ —4.5 (2種)	21.5	22	+1.5	-10	2,813.3	2,679.3	96	3.5	30	なし	7	7
B	鋼管矢板 φ1066.5	16	17~19	+2.1	-7.5	1,929.6	2,196.2	79	3.0	10	なし	7	6
C	鋼管矢板 φ1016	19	31.5	+2.1	-4.5	2,048.2	9,123.9	143	3.0	20	なし	6	6
D	FSP-IVA	16.1	23	+2.6	-5.5	1,263.2	3,013.2	67	3.2	20	なし	11	10.6
E	YSP-F	9.5	16~22	+1.75	-7.5	4,158.8	2,726.7	256 3	2.0 2.5	20	±0m上 錆止め	8	7.7
F	FSP-III	13	22	+1.85	-4.0	496.3	1,689.6	24	3.5	20	-0.5m上 塗装	9	8.7
G	鋼管杭 φ610	上杭12 下杭9	27	+0.6	-9.0	1,557.8	3,445.8	92	2.5	10	なし	13	12.8
H	FSP-VL	24.3	22.7	+4.0	-10	5,533.4	2,202.4	206 ²⁾	2.9	25	なし	11	10.7
I	鋼管杭 φ700	13	41	+1.7	-10	928.5	4,115.9	77	2.5	20	-1m上 塗装	8	7.5
J	橋脚 外板	上 19 下 16			-4~ -14.5	615	0	42	1.5	20	錆止め	7	6.7

1) 初期

2) 206 個中, 28 個脱落 (S.54年現在 178 個)

港名	環境	流速	港名	環境	流速
A	自然海水	小	F	自然海水	小
B	自然海水でない	小	G	"	小
C	"	小	H	"	中
D	"	小	I	"	小
E	"	小	J	"	大

調査構造物は、鋼矢板構造物 (A, D, F, H港の 4 例)、セル構造物 (E港の 1 例)、鋼管杭構造物 (G, I 港の 2 例)、橋脚外板 (J港の 1 例) の 5 種類である。

図一 1 に調査港の位置を、付図一 1~付図一 10 に調査構造物の位置、正面図、断面図を示す。

3. 陽極調査

3.1 調査方法

(1) 調査陽極の個数及び形状寸法

表一 2 に示すように、取付深度が 1 深度の場合は 4 個、

取付深度が 2 深度と 3 深度の場合は 6 個の陽極について調査した。調査陽極の位置は付図一 1~付図一 10 を参照。

(2) 陽極の閉路電位測定

陽極の電位測定の要領を図一 2 に示す。基準電極 (海水塩化銀電極) の先端を潜水夫が陽極の上, 中, 下の個所に押しあて、陸上部に設置した電位計で計測した。陽極の長さは 60cm~170cm (表一 2 参照) であるから、上, 中, 下の間隔は 20cm~数 10cm となる。電位測定は陽極表面の付着物除去の前後に行った。

(3) 陽極の発生電流測定

陽極の発生電流測定の要領を図一 3 に示す。陽極は図一 2 に見られるように上下から出ている芯金によって取付 (溶接で) られている。片方の芯金と構造物間にシャント抵抗 (5 A, 50mV, 防水型) を挿入してからその芯金を構造物から切りはずし、電圧降下法により発生電流を測定した。発生電流測定は陽極の付着物除去前に行った。

(4) 陽極の重量測定



図一 電防調査構造物の位置

表一 調査陽極の数量および形状寸法

港名	取付深度	調査地点	調査陽極数 (個)	形状寸法 (mm)
A	3	2	6	(240+300)×270×1000
B	2	3	6	(90+130)×120×1700
C	1	4	4	(190+230)×200×1000
D	1	4	4	(140+160)×160×1500
E	2	3	6	(170+210)×190×800
F	1	4	4	(240+260)×250×600
G	1	4	4	(140+160)×150×700
H	3	2	6	(230+170)×200×1000
I	2	3	6	(170+210)×190×1000
J	2	3	6	(160+200)×185×1300

構造物に溶接してある陽極上下の芯金部分を切断して陽極を陸上に回収し、付着物（海洋生物及び腐食生成物）を十分に除去してから陽極の重量を台秤（最小目盛 0.1 kg）で秤量した。陽極の残存重量を用いて以下のよう

に発生電流及び陽極寿命を算出した。

$$\text{消耗量(kg)} = \text{初期重量(Gross)} - \text{残存重量(Gross)} - \text{切り落した芯金重量} \quad \dots\dots(1)$$

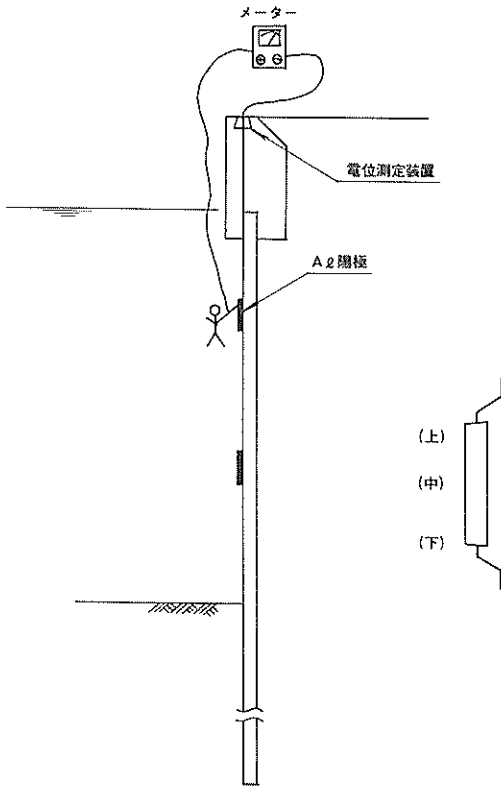


図-2 陽極の電位測定法

$$\text{残存重量 (Net) (kg)} = \text{初期重量 (Net)} - \text{消耗量} \quad \dots(2)$$

$$\text{平均発生電流 (A)} = \frac{\text{消耗量} \times \text{陽極有効電気量}^{\ast\ast}}{\text{取付期間}} \quad \dots(3)$$

$$\ast\ast \text{ Al 合金陽極の有効電気量} = \frac{1}{3.8} (\text{A} \cdot \text{y} / \text{kg})$$

$$\text{指定残寿命 (y)} = \frac{\text{残存重量 (Net)} \times \text{有効電気量}^{\ast\ast}}{\text{平均発生電流}} \quad \dots(4)$$

(重量測定による)

$$\text{指定残寿命 (y)} = \frac{\text{残存重量 (Net)} \times \text{有効電気量}^{\ast\ast}}{\text{発生電流 (測定)}} \quad \dots(5)$$

(電流測定による)

(5)陽極の観察

陸上に設置した回収陽極面の写真撮影(カラー)を付着物除去前後に行った。(観察終了後に回収陽極を元の取付位置に水中溶接して原状に復帰させた)。

3.2 陽極の閉路電位測定

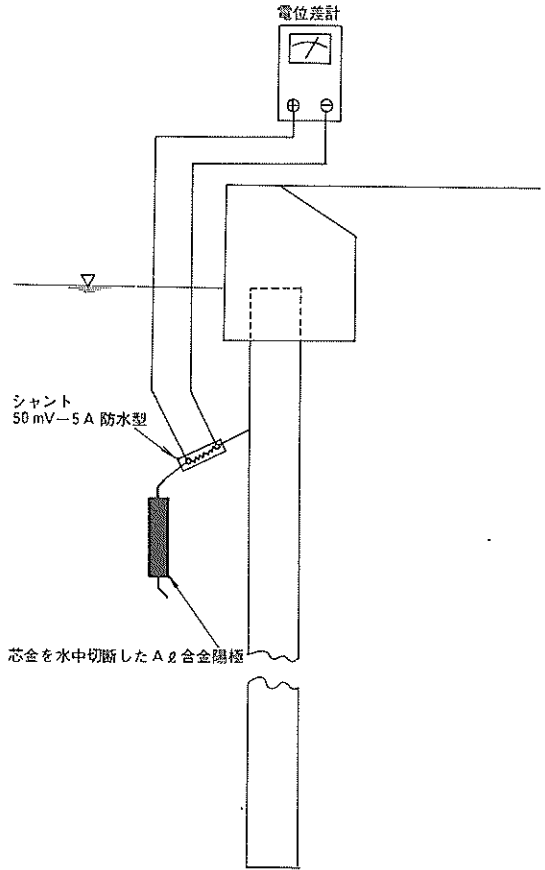


図-3 陽極の発生電流測定法

一般的なAl合金陽極の性能を付表-1に示す。流電陽極材料としては、被防食金属体よりも十分に低電位な金属であること、使用全期間を通じ有効電位差が十分に維持されることがまず必要である。

陽極の閉路電位の測定結果を表-3、図-4に示す。

(1)付着物除去前の電位

付着物除去前の陽極電位(平均)は、-1000~-1100 mV(海水塩化銀電極基準)の範囲であり、鋼材に対して十分卑な電位を示した。その内訳は、A, B, D, F, G港では、-1000~-1010 mV, C, E, I, J港では-1030~-1060 mV, H港では、-1100 mV程度であった。陽極面上の位置(上, 中, 下, 図2参照)による電位のバラツキの範囲は、10~30 mV (J, H, A, I, D, G港)と40~60 mV (B, C, F, E港)のグループがあった。

表一 3 陽極の閉路電位測定結果

港名	陽 極		陽 極 電 位 (mV) ¹⁾					港名	陽 極		陽 極 電 位 (mV) ¹⁾					
	No	深度 (m)	付着物除去前		付着物除去後		差 ²⁾		No	深度 (m)	付着物除去前		付着物除去後		差 ²⁾	
			平均	最大差	平均	最大差					平均	最大差	平均	最大差		
A	A	- 1	- 995	20	- 1100	5	105	F	A	- 2	- 1015	85	- 1095	10	80	
	B	- 1	- 1005	10	- 1100	5	95		B	- 2	- 1015	55	- 1120	5	105	
	C	- 4	- 1000	15	- 1100	5	100		C	- 2	- 985	45	- 1105	5	120	
	D	- 4	- 1005	15	- 1085	5	80		D	- 2	- 985	40	- 1115	10	130	
	E	- 7	- 995	20	- 1090	10	95		平均		- 1000	56	- 1109	8	109	
	F	- 7	- 1000	5	- 1085	5	85		A	- 2.5	- 1005	25	- 1085	10	80	
	平均		- 1000	14	- 1093	6	93		B	- 2.5	- 1015	35	- 1085	5	70	
B	A	- 1	- 979	12	- 1151	18	172	G	C	- 2.5	- 1015	45	- 1070	5	55	
	B	- 1	- 994	10	- 1147	12	153		D	- 2.5	- 1020	30	- 1090	5	70	
	C	- 1	- 973	38	- 1131	7	158		平均		- 1014	34	- 1083	6	69	
	D	- 4	- 1020	83	- 1142	15	122		H	A	- 1	- 1090	5	- 1100	10	10
	E	- 4	- 1054	69	- 1137	9	83			B	- 1	- 1095	10	- 1100	10	5
	F	- 4	- 1029	35	- 1142	13	113			C	- 3.5	- 1100	20	- 1115	10	5
	平均		- 1008	41	- 1142	12	134			D	- 6	- 1085	25	- 1120	10	35
A	- 1.5	- 1020	15	- 1130	30	110	E	- 6		- 1090	15	- 1120	5	30		
B	- 1.5	- 1030	40	- 1145	15	115	F	- 8.5		- 1105	5	- 1115	10	10		
C	- 1.5	- 1015	10	- 1130	5	115	平均			- 1094	13	- 1112	9	18		
C	D	- 1.5	- 1055	100	- 1135	15	80	A	- 2	- 1045	11	- 1136	10	91		
	平均		- 1030	41	- 1135	16	105	B	- 2	- 1034	44	- 1125	26	91		
	A	± 0	- 1015	25	- 1047	63	32	I	C	- 2	- 1053	5	- 1123	22	70	
	B	± 0	- 967	26	- 1107	12	140		D	- 5	- 1045	10	- 1124	27	79	
	C	± 0	- 986	29	- 1068	13	82		E	- 5	- 1013	19	- 1116	18	103	
D	± 0	- 1013	44	- 1098	31	85	F		- 5	- 1066	11	- 1121	7	55		
平均		- 995	31	- 1080	30	85	平均			- 1043	17	- 1124	18	81		
E	A	- 1.5	- 1028	13	- 1125	12	97	J	A	- 5	- 1062	3	- 1089	5	27	
	B	- 1.5	- 1008	53	- 1133	1	125		B	- 5	- 1066	9	- 1102	26	36	
	C	- 1.5	- 1061	100	- 1145	15	88		C	- 5	- 1064	4	- 1114	22	50	
	D	- 6.0	- 1061	105	- 1142	16	81		D	- 10	- 1065	16	- 1116	17	51	
	E	- 6.0	- 1016	73	- 1141	18	125		E	- 10	- 1064	7	- 1110	23	46	
	F	- 6.0	- 1003	30	- 1151	15	148		F	- 10	- 1057	1	- 1112	19	55	
	平均		- 1030	62	- 1140	13	110		平均		- 1063	7	- 1107	19	44	

1) 海水塩化銀電極基準

2) 付着物除去前後の平均値差

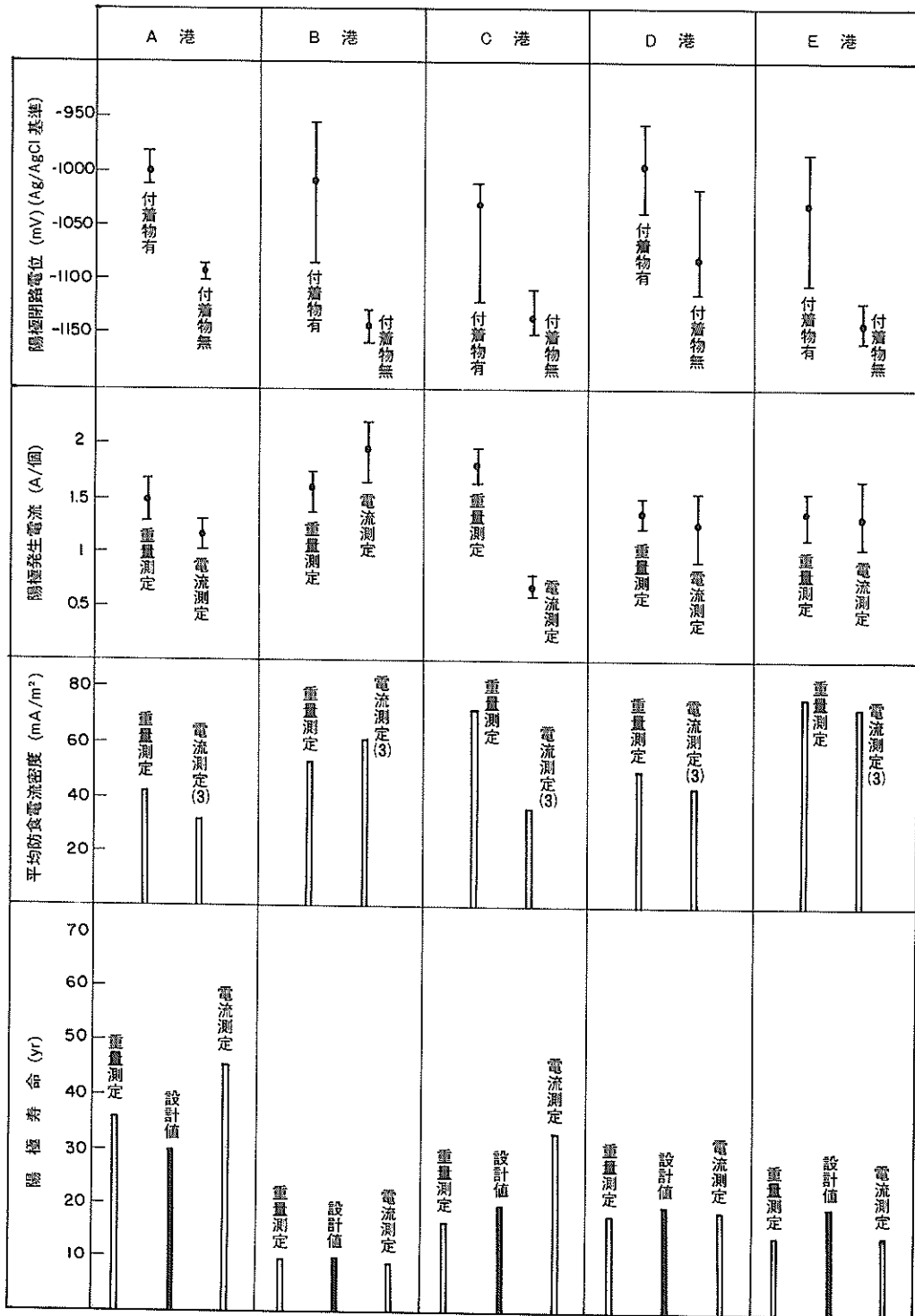


図-4 陽極の調査結果(1)

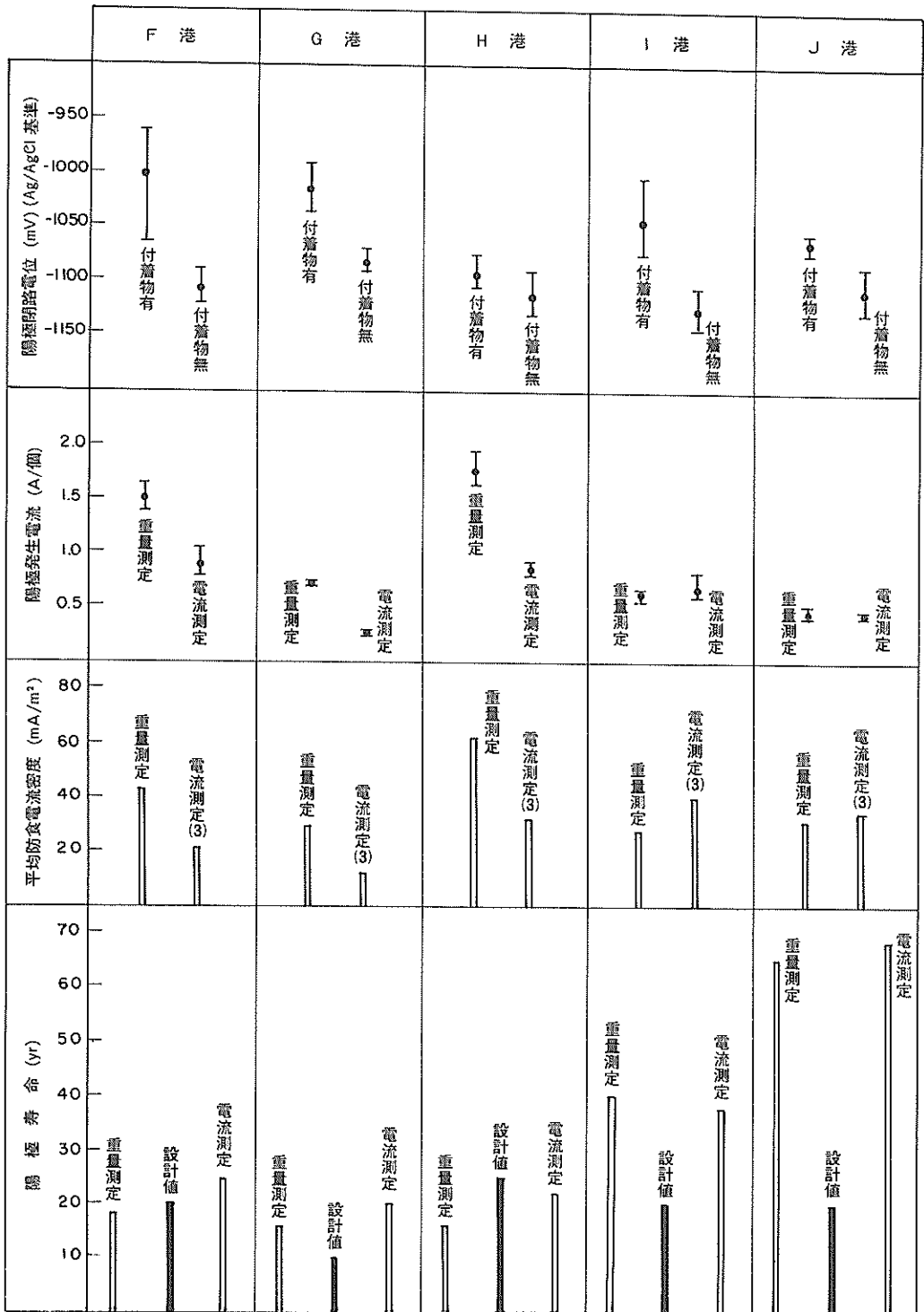


図-4 陽極の調査結果(2)

特に後者のグループでは、上中下の位置による電位差が100 mV程度の陽極が存在した。これらの陽極の電位を記してみると、次のようになる。

港名	陽極No.	深度(m)	電位 (mV)			
			上	中	下	最大差
B	D	-4	-1000	-1071	-988	83
C	D	-1.5	-1020	-1120	-1030	100
F	A	-2	-1000	-1065	-980	85
E	C	-1.5	-1096	-1090	-996	100
E	D	-6	-1080	-1040	-999	105

上記5例の陽極面上には-1100 mVに近い電位の箇所が存在する。このため図-4に見られるようにB, C, E, F港では付着物除去前の電位範囲が大きい。-1100 mVは付着物を除去したAl合金陽極の電位に近似するので、何らかの理由で陽極表面上の付着物が部分的に脱落したことが電位のバラツキの原因ではないかと予想される。

一方、バラツキの小さいグループでは、A港のように平均値が-1000 mV付近でバラツキの小さいケースとH, J港のように平均値が-1100 mV付近でバラツキの小さいケースがある。

(2)付着物除去後の電位

付着物を除去した陽極の電位(平均)は-1080~-1150 mV(海水塩化銀電極基準)の範囲であった。この値は、Al合金陽極の開路電位にほぼ近似する。B, E 2港の陽極電位は-1150 mV程度と最も卑であったが、他の8港の陽極電位は-1100 mV内外であった。陽極表面上の位置(上, 中, 下)による電位の差は付着物除去前に比べて小さく、ほぼ10~30 mV程度であった。ただしD港の陽極Aについては、次のように63 mVと大きかった。

港名	陽極No.	深度(m)	電位 (mV)			
			上	中	下	差
D	A	±0	-1050	-1077	-1014	63

このように下の箇所の電位が-1014 mVと貴であったのは、この部分の付着物除去が上, 中の箇所に比べて不十分であったのではないかと予想される。

(3)付着物の有無による電位差

流電陽極としては、電流を発生するときに陽極電位が貴となる程度が小さいほど都合がよい。通電による陽極の電位上昇(付着物除去前後の電位差)は平均値でみると100 mV前後の港が多かったが、H, J, G港では100 mV以下であり特に、H, J港では20~40mVと

小さかった。これに対して、B港では130 mVと大きかった。平均で100 mV前後であった港においても、個別にはD港(陽極B), E港(陽極B, E, F), F港(陽極C, D)のように120 mVを上廻るところがあった。D港陽極Aの電位差が32mVと小さかったのは、付着物除去後の電位が-1047 mVと他の陽極に比べてかなり貴な値のためである(表3参照)。このように貴な電位を示したことは、付着物除去の不十分さによるものと思われる。これに対して、H港の電位差は平均で18mV, 最小で5mVと小さいが、付着物除去後の電位はD港陽極Aと異なってH港では何れも-1120 mV程度と卑であった。H港の電位上昇が20mV程度と小さかったのは付着物除去前の電位が約-1100 mVと卑であったことによる。

3.3 陽極の発生電流測定

陽極の発生電流測定結果を表-4, 図-4に示す。

(1)発生電流の低減率

陽極の発生電流の経年変化をみるために、(6)式より発生電流の低減率を算出した。

$$\text{低減率} = \frac{\text{発生電流(測定値)}}{\text{発生電流(初期値)}} \times 100 (\%) \dots(6)$$

陽極の発生電流は経年とともに次第に減少して行き、3~4年後には一定値となるといわれる。調査港の中、低減率が50%以上であったのはB港(65%), E港(65%)の2港のみである。他港では低減率は大体30~40%であったが、G港のみは約10%と著しく小さかった。低減率の小さい陽極ほど電防上経済的である。

水質調査結果(図-11参照)によれば、発生電流の低減率が50%以上であったB, E港は自然海水ではない。

(2)防食電流密度

6年以上経過して安定した防食電流密度を、表-4の(1), (2), (3)のように3通り算出した。防食電流密度(1)と(2)は調査構造物全体を対象としたもので、(1)の場合の防食面積は初期の値(設計値), (2)の場合の防食面積は調査時点の値をとった。防食電流密度(3)は調査陽極の防食範囲を対象としたもので、この場合の防食面積は水深変化を加味した調査陽極の防食範囲である。なお、海泥中の防食面積は防食電流密度(初期)比に応じて海水中心面積に換算した。防食電流密度(初期, 海水中)はC港では120 mA/m², D港では115 mA/m², E, I港では110 mA/m², 他は100 mA/m²であった。

防食電流密度としては(1)の値が一般に使用される。水深変化が伴う場合には(2)または(3)の値を算出することになるが、実際には(3)の値を求める方がより簡単である。

表一 4 陽極發生電流測定結果

港名	陽極		發生電流			防食電流密度			港名	陽極		發生電流			防食電流密度			
	No	深度 (m)	初期 (A)	測定 (A)	低減率 (%)	(mA/m ²)				No	深度 (m)	初期 (A)	測定 (A)	低減率 (%)	(mA/m ²)			
						(1)	(2)	(3)							(1)	(2)	(3)	
A	A	-1	3.5	1.02	29				F	A	-2	3.5	0.80	23				
	B	-1	3.5	1.05	30					B	-2	3.5	0.83	24				
	C	-4	3.5	1.15	33					C	-2	3.5	0.85	24				
	D	-4	3.5	1.10	31					D	-2	3.5	1.05	30				
	E	-7	3.5	1.30	37					平均		3.5	0.88	25	25	29	21	
	F	-7	3.5	1.23	35					G	A	-2.5	2.5	0.29	12			
	平均		3.5	1.14	33	33	33	32			B	-2.5	2.5	0.30	12			
B	A	-1	3.0	1.75	58				C		-2.5	2.5	0.26	10				
	B	-1	3.0	1.65	55				D	-2.5	2.5	0.25	10					
	C	-1	3.0	1.95	65				平均		2.5	0.28	11	12	12	12		
	D	-4	3.0	2.10	70				H	A	-1	2.9	0.90	31				
	E	-4	3.0	2.13	71					B	-1	2.9	0.82	28				
	F	-4	3.0	2.20	73					C	-3.5	2.9	0.86	30				
	平均		3.0	1.96	65	65	65	61		D	-6	2.9	0.93	32				
C	A	-1.5	3.0	0.70	23					E	-6	2.9	0.80	28				
	B	-1.5	3.0	0.80	27				F	-8.5	2.9	0.81	28					
	C	-1.5	3.0	0.60	20				平均		2.9	0.85	29	25	30	32		
	D	-1.5	3.0	0.75	25				I	A	-2	2.5	0.70	28				
	平均		3.0	0.71	24	28	36	36		B	-2	2.5	0.63	25				
D	A	±0	3.2	1.02	32					C	-2	2.5	0.60	24				
	B	±0	3.2	1.53	48					D	-5	2.5	0.65	26				
	C	±0	3.2	0.92	29					E	-5	2.5	0.63	25				
	D	±0	3.2	1.55	48				F	-5	2.5	0.83	33					
	平均		3.2	1.26	39	45	44	44	平均		2.5	0.67	27	29		40		
E	A	-1.5	2.0	1.15	58				J	A	-5	1.5	0.43	29				
	B	-1.5	2.0	1.30	65					B	-5	1.5	0.45	30				
	C	-1.5	2.0	1.30	65					C	-5	1.5	0.48	32				
	D	-6	2.0	1.05	53					D	-10	1.5	0.41	27				
	E	-6	2.0	1.30	65					E	-10	1.5	0.43	29				
	F	-6	2.0	1.68	84					F	-10	1.5	0.45	30				
	平均		2.0	1.30	65	72	72	73		平均		1.5	0.44	29	30		34	

- (1) 全發生電流/全防食面積 (初期)
 (2) " / " (現在)
 (3) 調査陽極の發生電流/調査陽極の防食面積 (現在)

防食電流密度は初期値より経年とともに漸減して行き一定値に落ち着くといわれる。その1例を付図-11に示す。調査構造物は表-1に示すように6年~13年経過しているため、今回測定した防食電流は一定値に達した値であろうと考えられる。一般には、一定値は初期値の約半分と仮定される。表-4では、防食電流密度が初期値の50%以上であったのはB港とE港のみで、他は50%以下であった。電流測定による値からでは、防食電流密度(初期)を電防設計時に割増する必要のあるのはB、E2港となる。一定値が初期値の50%と仮定すると、所要防食電流密度(初期)はB港では130 mA/m²、E港では140 mA/m²程度となる。D港では45%で50%に近い値であるが、A、C、F、H、I、J港では20~30%程度と小さく、さらにG港では12%と小さい。付図-11のように防食電流密度が減少するのは、通電によってカソードである鋼材面に石灰質の皮膜が生成すること、Al合金陽極の電位が貴となって有効電位差が減少すること等が原因である。H、I、J港では良質の石灰質皮膜の被覆効果が顕著なようである(図-4、11参照)。これに対して、B、E港では水質の影響のためか良質な石灰質被膜が生成しにくかったようである。他の港では、有効電位差の減少と良質な石灰質被膜の生成によるとみられ、特に、G港では石灰質被覆の効果と潮位間に塗布した塗膜の影響が大きいのと思われる。なお、E港では塗装の防食電流密度の減少に対する効果はみられず、塗装されたF、I、J港の防食電流密度は無塗装のA、C、H港の値と大差なかった。

(3)陽極の推定寿命

(5)式から算出した陽極の推定寿命は表-5に示す。電流値から推定した陽極寿命が設計寿命を上廻ったのはA、C、F、G、I、Jの6港であり、推定寿命が設計寿命に不足したのはB、D、E、Hの4港であった。設計寿命を上廻った期間はF港で数年、G港で10年、A、C、I港で10数年、J港で50年程度であった。設計寿命に不足した期間はB、C港で1年、H、E港で数年程度であった。

3.4 陽極の重量測定

陽極の重量測定結果を表-5、図-4に示す。

(1)陽極消耗量(年間平均)

陽極1個当りの年間平均の消耗量はJ、I、G港で2~3 kg、D、E、A、F港で5.5 kg前後、B、C、H港で6~7 kgであった。

陽極が複数の深度に取付けてある構造物について、各深度における陽極消耗量を比較してみる。

港名	深度(m)	陽極消耗量(kg) (年間平均)	全深度当りの平均値 との差(kg)
A	-1	5.2	-0.3
A	-4	5.3	-0.2
A	-7	6.3	+0.8
B	-1	5.7	-0.4
B	-4	6.5	+0.4
E	-1.5	5.0	-0.2
E	-6	5.5	+0.3
H	-1	7.0	+0.2
H	-3.5	6.8	±0
H	-6	6.4	-0.4
H	-8.5	7.5	+0.7
I	-2	2.3	-0.1
I	-5	2.4	±0
J	-5	1.7	-0.1
J	-10	1.8	±0

A、B、E港では取付深度の浅い陽極の方が深い陽極よりも陽極消耗量は小さい傾向が見られるが、H、I、J港ではこのような傾向は見られない。

(2)発生電流の低減率

(6)式の発生電流(測定値)に重量測定から求めた発生電流(年間平均)値を代入して、重量測定の場合の発生電流の低減率を算出した(表-5参照)。低減率が50%以下であったのはA、D、F、G、I、Jの6港で、この中、G、I、Jの3港では30%程度と特に小さかった。反対に、低減率が50%以上であったのはB、C、E、Hの4港で、中でもE港では約70%と特に大きかった。電流測定の場合と同じく、重量測定による発生電流の低減率の小さい程電防上経済的である。

重量測定による発生電流の低減率(表-4参照)と電流測定による発生電流の低減率(表-5参照)を比較すると、電流測定による低減率の方が大きいのは僅かB港のみで他港では重量測定による低減率の方が大きかった。後者の中、D、E、I、J港では1~4%、A港では9%、F、G港では18%、C、H港では35~36%重量測定の方が大きかった。B港では12%電流測定の方が大きかった。

(3)陽極の推定寿命

(4)式から陽極寿命を推定すると、表-5のようになる。

重量測定による陽極の推定寿命が設計寿命を上廻ったのはA、G、I、Jの4港で、この中、A、G港では数年、I港で約20年、J港で約40年推定寿命の方が大きい。一方、重量測定による陽極の推定寿命が設計寿命を下廻

ったのはB, C, D, E, F, Hの6港で, B港では0.2年, D, F港では2年弱, C港では約3年, H港では9年推定寿命の方が小さかった。

なお, 陽極の推定寿命は電流測定からの値と重量測定からの値の中間に位置するが, 長期的には, 電流測定からの値に近似する。したがって陽極調査としては両測定を行うのが望ましい。

(4)防食電流密度

重量測定による防食電流密度を表—5に示す。この場合の防食電流密度の算出に使用した防食面積は初期の値である。一般には, このように防食電流を初期の防食面積で割った値が防食電流密度として利用される。防食電流密度が50mA/m²以下であったところはA, D, F, G, I, Jの6港(ただし, D港では49mA/m²ではほぼ50mA/m²)であり, 中でもG, I, J港では約30mA/m²と小さかった。一方, 防食電流密度が50mA/m²以上であったところはB, C, E, Hの4港であり, 中でもC, E港では70mA/m²以上と特に大きかった。防食電流密度は経時的に低減して初期値の50%に到着くと仮定すれば, 重量測定に基づく防食電流密度(初期)はB港では110mA/m², C港では140mA/m², E港では150mA/m², H港では120mA/m²程度必要となる。なお, H港で電流密度が50mA/m²以上となったのは, 陽極の一部が脱落したため残りの陽極1個当りの負担が大きくなったことが一因かと思われる。

重量測定と電流測定から求めた発生電流値を比較すると, 次の3通りがある。

- ①両者間に差がない … D, E, I, J港
- ②重量測定の方が大きい … A, C, F, G, H港
- ③電流測定の方が大きい … B港

付図11に示す防食電流の経時変化状況を参照すると, 重量測定による防食電流は初期値と安定値間の平均値に相当し, 電流測定による防食電流は安定値に相当する。①のケースは, 比較的早く安定値に達したため6年以上経過した調査時点では初期値の影響をほとんど無視し得ることを意味し, ②のケースは, 安定値に達するのが比較的遅い等のため調査時点でも初期値の影響をまだ無視できないことを示し, ③のケースは陽極表面の付着物除去の不十分さが一因と思われる。

3.5 陽極の観察

陽極の観察結果を写真—1~写真—10に示す。

回収した陽極の表面は腐食生成物と海洋生物に覆われている。写真に示す陽極表面で部分的にこれらの被覆がはがれたところが見られる。これは陽極を陸上に回収す

るときの衝撃でとれたもので, 例えば写真—5 (E港)の陽極Fのような付着物の剥離は陽極を陸上に設置するときのショック等で容易に生じた。このように海洋生物の除去は比較的簡単に行えたが, 内層としてAl合金陽極に密着した腐食生成物の除去は面倒な作業であった。Al-Zn-In系のAl合金陽極では, 低陽極電流密度の時は腐食生成物は固着する傾向がある⁴⁾ので, 陽極表面の密着層をハンマーで入念に叩いて除去した。

腐食生成物を除去したAl合金陽極の表面には, 次のケースがある。

- ①比較的平滑なケース … J港
- ②小さな凹凸のあるケース … A, E, F, I港
- ③大きな凹凸のあるケース … D, G港
- ④平滑面と小さな凹凸のあるケース … C港
- ⑤大小の凹凸のあるケース … B, H港

陽極表面の形状と発生電流の関連を代表例について比較してみる。

港名	陽極No.	表面状況	発生電流低減率 (%)	
			重量測定	電流測定
C	D	①	66	25
B	D	①	56	70
A	A	②	39	29
B	B	②	46	55
C	B	②	55	27
D	A	③	38	32
G	C	③	29	10

上記の比較では, 陽極表面の凹凸状況と発生電流低減率とは特に関係はなさそうである。さらに同一港で比べてみる。

港名	陽極No.	表面状況	発生電流低減率 (%)	
			重量測定	電流測定
C	A	②	60	23
C	B	②	55	27
C	C	②	59	20
C	D	①	66	25

同一港の比較例についても表面状況による発生電流低減率の差はあまりない。

水質と陽極の表面状況との関係をみるために, 溶存酸素量が多かったA, I, J港のグループと溶存酸素量が少なかったB, D, E港のグループについて陽極の表面状況を比較してみる。写真—1, 9, 10と写真—2, 4, 5を参照すると, A, I, J港の方がB, D, E港より陽極の凹凸は小さい傾向がある。しかし, H港では溶存酸素

表—5 陽極重量測定結果(1)

港名	陽極		陽極重量(kg)				年間平均 ¹⁾ 発生電流 (A)	発生電流 ²⁾ 低減率 (%)	防食電 流密度 (mA/m ²)	推定残寿命(年)		推定総寿命(年)	
	Na	深度 (m)	初期 (Net)	残量 (Net)	消耗量	年間 平均 消耗量				重量 測定	電流 測定	重量 測定	電流 測定
A	A	-1	200.5	163.6	36.9	5.3	1.38	39		31.0	42.1	38.0	49.1
	B	-1	200.5	165.6	34.9	5.0	1.31	37		33.2	41.4	40.2	48.4
	C	-4	200.5	163.2	37.3	5.3	1.40	40		30.6	37.3	37.6	44.3
	D	-4	200.5	164.4	36.1	5.2	1.35	39		31.9	39.2	38.9	46.2
	E	-7	200.5	155.6	44.9	6.4	1.68	48		24.3	31.4	31.3	38.4
	F	-7	200.5	158.0	42.5	6.1	1.59	45		26.0	33.7	33.0	40.7
	平均			200.5	161.7	38.8	5.5	1.46	42	42	29.2	38.3	36.2
B	A	-1	59.5	24.5	35.0	5.8	1.53	51		4.2	3.7	10.2	9.7
	B	-1	59.5	27.7	31.8	5.3	1.38	46		5.2	4.4	11.2	10.4
	C	-1	59.5	23.7	35.8	6.0	1.57	52		4.0	3.2	10.0	9.2
	D	-4	59.5	21.4	38.1	6.4	1.67	56		3.4	2.7	9.4	8.7
	E	-4	59.5	20.4	39.1	6.5	1.72	57		3.1	2.5	9.1	8.5
	F	-4	59.5	19.4	40.1	6.7	1.75	58		2.9	2.3	8.9	8.3
	平均			59.5	22.9	36.6	6.1	1.60	53	53	3.7	3.1	9.7
C	A	-1.5	115.2	74.2	41.0	6.8	1.79	60		10.9	27.8	16.9	33.8
	B	-1.5	115.2	77.8	37.4	6.2	1.64	55		12.5	25.5	18.5	31.5
	C	-1.5	115.2	75.0	40.2	6.7	1.76	59		11.2	32.8	17.2	32.8
	D	-1.5	115.2	70.1	45.1	7.5	1.97	66		9.3	24.5	15.3	30.5
	平均			115.2	74.3	40.9	6.8	1.79	60	72	10.9	27.5	16.9
C	A	±0	95.1	45.6	49.5	4.7	1.23	38		9.8	11.7	20.4	22.3
	B	±0	95.1	39.5	55.6	5.2	1.38	43		7.5	6.8	18.1	17.4
	C	±0	95.1	34.2	60.9	5.7	1.51	47		5.9	9.7	16.5	20.3
	D	±0	95.1	40.0	55.1	5.2	1.37	43		7.7	6.8	18.3	17.4
	平均			95.1	39.8	55.3	5.2	1.37	43	49	7.6	8.3	18.2
E	A	-1.5	76.8	43.2	33.6	4.4	1.14	57		9.9	9.9	17.6	17.6
	B	-1.5	76.8	36.1	40.7	5.3	1.39	70		6.8	7.3	14.5	15.0
	C	-1.5	76.8	36.0	40.8	5.3	1.39	70		6.8	7.3	14.5	15.0
	D	-6	76.8	38.2	38.6	5.0	1.31	66		7.6	9.5	15.3	17.2
	E	-6	76.8	33.3	43.5	5.6	1.48	74		5.9	6.7	13.6	14.4
	F	-6	76.8	31.5	45.4	5.9	1.55	78		5.3	4.9	13.0	12.6
	平均			76.8	36.4	40.4	5.2	1.38	69	76	6.9	7.3	14.6

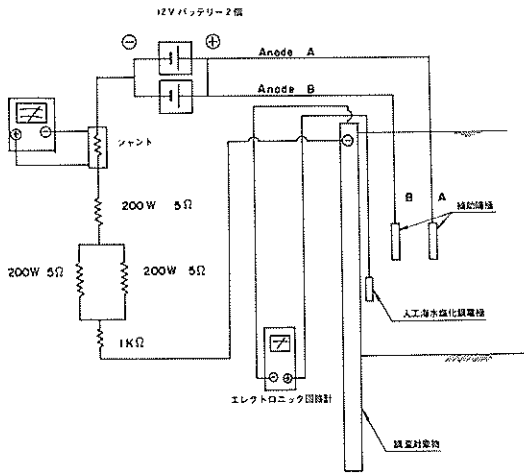
1) 消耗量 / { 3.8 (kg/A · y) × 防食期間(y) } 2) (年間平均発生電流 / 初期発生電流) × 100

表一5 陽極重量測定結果(2)

港名	陽極		陽極重量(kg)				年間平均 ¹⁾	発生電流 ²⁾	防食電	推定残寿命(年)		推定総寿命(年)	
	Na	深度(m)	初期(Net)	残量(Net)	消耗量	年間平均消耗量	発生電流(A)	低減率(%)	流密度(mA/m ²)	重量測定	電流測定	重量測定	電流測定
F	A	-2	103.3	55.1	48.2	5.5	1.46	42		9.9	18.1	18.6	26.8
	B	-2	103.3	56.9	46.4	5.3	1.40	40		10.6	18.0	19.3	26.7
	C	-2	103.3	53.6	49.7	5.7	1.51	43		9.4	16.6	18.0	25.3
	D	-2	103.3	49.1	54.2	6.2	1.64	47		7.9	12.3	16.5	21.0
	平均		103.3	53.7	49.6	5.7	1.50	43	43	9.4	16.0	18.1	24.7
G	A	-2.5	43.0	8.8	34.2	2.7	0.70	28		3.3	8.0	16.0	20.8
	B	-2.5	43.0	7.8	35.2	2.8	0.72	29		2.8	6.8	15.6	19.6
	C	-2.5	43.0	7.9	35.1	2.7	0.72	29		2.9	8.0	15.6	20.8
	D	-2.5	43.0	6.6	36.4	2.8	0.75	30		2.3	6.9	15.1	19.7
	平均		43.0	7.8	35.2	2.8	0.72	29	29	2.8	7.3	15.8	20.1
H	A	-1	109.0	31.4	77.6	7.3	1.91	66		4.3	9.2	15.0	19.9
	B	-1	109.0	38.9	70.1	6.6	1.73	60		5.9	12.5	16.6	23.2
	C	-3.5	109.0	36.5	72.5	6.8	1.78	61		5.4	11.1	16.1	21.8
	D	-6	109.0	40.3	68.7	6.4	1.69	58		6.3	11.4	16.9	22.1
	E	-6	109.0	41.5	67.5	6.3	1.66	57		6.6	13.6	17.2	24.3
	F	-8.5	109.0	29.2	79.8	7.5	1.96	68		3.9	9.5	14.6	20.2
	平均		109.0	36.3	72.7	6.8	1.79	64	62	5.3	11.2	16.0	21.9
I	A	-2	96.2	77.5	18.7	2.5	0.65	26		31.9	29.1	38.5	36.6
	B	-2	96.2	79.9	16.3	2.2	0.57	23		36.6	33.3	44.1	40.8
	C	-2	96.2	78.6	17.6	2.3	0.61	24		33.4	34.4	40.9	41.9
	D	-5	96.2	77.1	19.1	2.5	0.67	27		30.2	31.1	37.7	38.6
	E	-5	96.2	77.9	18.3	2.4	0.64	26		31.9	32.5	39.4	40.0
	F	-5	96.2	78.2	18.0	2.4	0.63	25		32.6	24.7	40.1	32.2
	平均		96.2	78.2	18.0	2.4	0.63	25	28	32.6	30.6	40.1	38.1
J	A	-5	115.2	103.8	11.4	1.7	0.45	30		60.7	63.3	67.4	70.0
	B	-5	115.2	104.3	10.9	1.6	0.43	29		64.0	60.9	70.7	67.6
	C	-5	115.2	102.9	12.3	1.8	0.48	32		55.9	56.3	62.6	63.0
	D	-10	115.2	103.2	12.0	1.8	0.48	32		57.7	66.1	64.4	72.8
	E	-10	115.2	101.7	13.5	2.0	0.52	35		50.6	62.1	57.3	68.8
	F	-10	115.2	104.3	10.9	1.6	0.43	29		64.0	60.9	70.7	67.6
	平均		115.2	103.4	11.8	1.8	0.46	31	31	58.4	61.7	65.1	68.4

1) 消耗量 / {3.8 (kg/A・y) × 防食期間(y)} 2) (年間平均発生電流 / 初期発生電流) × 100

表一六 鋼構造物の



図一五 通電試験法

量が比較的多かったけれども陽極表面の凹凸は大きい方である(写真一八)

防食電流密度(重量測定)が $50\text{mA}/\text{m}^2$ 以上であったB, C, E, Hの4港について陽極表面状態を比較してみると, B, E, Hの3港では凹凸が大きかったが, C港では比較的平滑もしくは凹凸が小さかった。以上のように, 陽極表面状態に影響する要因は複雑である。

4. 構造物調査

4.1 調査方法

(1) 構造物の電位測定

陽極調査地点A, B間の中間地点をCとし, A, B, C 3点で水深1m毎に構造物の電位を図一2の要領に準拠して測定した。基準電極は, 潜水夫が構造物に押しあてたケースと上部工より各深度毎に吊り下げたケースがある。電位測定は干潮, 満潮時に各1回宛行なった。ただし, J港では流速が速いため, 基準電極を押しあてる方法は行わなかった。

(2) 肉厚測定

肉厚測定は陽極の近く(AまたはBの地点)と陽極の中間地点(C)の2地点で行った。測定深度は海水面 $\pm 0\text{m}$ 間は 20cm ピッチとし, -0.5m の深度, -1m から海泥間は 1m ピッチとした。各深度における断面方向の肉厚測定は, 鋼矢板では凸, 凹面の1組, 鋼管矢板とセルは海側の1方向, 鋼管杭は海側と陸側の2方向とした。肉厚測定は超音波式探傷厚み計を用いて, 同一箇所を3回宛測定した。

港名	深度 (m)	干潮時		満潮時	
		(1)	(2)	(1)	(2)
A	+0.5	-913	-910	-910	-910
	± 0	-913	-915	-917	-920
	-1	-929	-960	-928	-965
	-2	-929	-985	-928	-980
	-3	-918	-930	-918	-925
	-4	-926	-910	-926	-910
	-5	-922	-900	-922	-900
	-6	-910	-895	-909	-890
	-7	-915	-890	-915	-880
	-8	-903	-875	-902	-870
	-9	-880	-865	-878	-865
-10	-870	-860	-868	-860	
B	+0.6~+1	-830	-795	-817	-804
	± 0	-834	-828	-819	-806
	-1	-858	-857	-848	-838
	-2	-882	-892	-882	-885
	-3	-888	-892	-881	-896
	-4	-905	-894	-893	-885
	-5	-942	-906	-908	-898
	-6	-900	-903	-895	-899
	-7	-887	-896	-880	-887
海泥中	-875	-896	-880	-884	
C	+0.5	-854	-850	-853	-850
	± 0	-859	-860	-858	-860
	-1	-903	-915	-902	-915
	-2	-952	-990	-951	-990
	-3	-938	-970	-938	-970
D	+0.6~+1	-939	-936	-916	-907
	± 0	-949	-945	-928	-920
	-1	-953	-950	-937	-933
	-2	-932	-929	-913	-912
	-3	-916	-912	-894	-898

(1) 基準電極: 吊下げ (2) 基準電極: 潜水夫が押しあて

(3) 通電試験

構造物への通電試験を図一5の要領で行った。補助陽極は5港(A, C, F, G, H)では2個, 他の5港(B, D, E, I, J)では調査陽極と同数(調査のため

電位測定結果

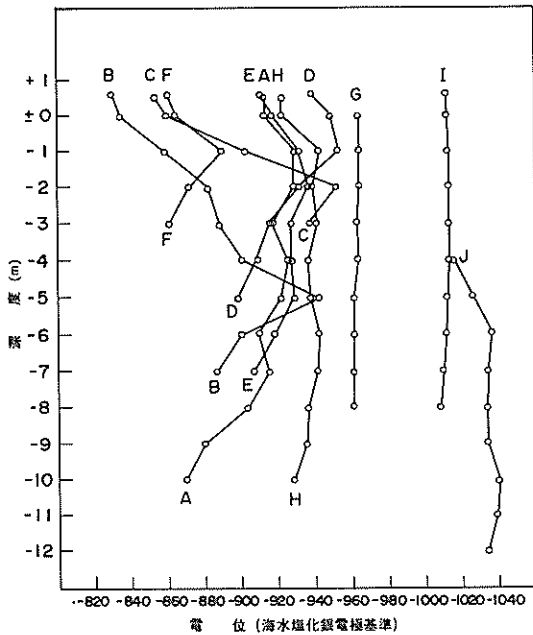
単位：mV（海水塩化銀電極基準）

港名	深度 (m)	干潮時		満潮時		港名	深度 (m)	干潮時		満潮時		
		(1)	(2)	(1)	(2)			(1)	(2)			
D	-4	-909	-905	-892	-890	H	-3	-941	-935	-938	-935	
	-5	-898	-902	-890	-892		-4	-936	-935	-936	-935	
	海泥中	-905	-902	-890	-892		-5	-937	-950	-936	-940	
E	+0.6~+1	-911	-900	-917	-910		-6	-942	-990	-938	-990	
	±0	-917	-910	-924	-918		-7	-941	-960	-938	-950	
	-1	-931	-934	-937	-945		-8	-936	-935	-939	-940	
	-2	-937	-931	-940	-938		-9	-935	-930	-943	-930	
	-3	-928	-920	-931	-925		-10	-928	-930	-926	-930	
	-4	-927	-928	-930	-931		I	+0.6~+1	-1,012	-1,008	-1,011	-1,010
	-5	-929	-934	-933	-938			±0	-1,012	-1,007	-1,011	-1,011
	-6	-918	-906	-921	-912	-1		-1,013	-1,010	-1,012	-1,012	
	-7	-907	-897	-910	-898	-2		-1,013	-1,012	-1,012	-1,014	
	海泥中	-904	-897	-906	-899	-3		-1,013	-1,014	-1,012	-1,013	
F	+0.6	-860	-870	-858	-870	-4		-1,013	-1,010	-1,012	-1,012	
	±0	-864	-890	-864	-890	-5		-1,012	-1,012	-1,011	-1,013	
	-1	-890	-1,005	-894	-1,005	-6		-1,011	-1,012	-1,010	-1,010	
	-2	-872	-940	-871	-940	-7		-1,010	-1,008	-1,009	-997	
	-3	-861	-890	-860	-890	-8		-1,008	-1,001	-1,006	-993	
	G	±0	-964	-960	-964	-960	海泥中	-1,001	-1,004	-1,004	-993	
-1		-964	-960	-964	-960	J	-4	-1,016		-966		
-2		-964	-980	-964	-980		-5	-1,026		-968		
-3		-963	-990	-963	-1,000		-6	-1,036		-969		
-4		-963	-970	-963	-970		-7	-1,034		-967		
-5		-961	-960	-963	-960		-8	-1,034		-966		
-6		-961	-960	-961	-960		-9	-1,034		-965		
-7		-961	-960	-961	-960		-10	-1,040		-965		
-8		-961	-960	-960	-960		-11	-1,039		-967		
H		+0.5	-922	-915	-911		-910	-12	-1,034		-964	
		±0	-922	-950	-921		-950	海泥中	-1,035		-956	
		-1	-943	-1,005	-942		-1,000					
	-2	-938	-970	-936	-970							

切取った陽極の位置に補助陽極を設置)を使用した。各港における補助陽極の位置及び基準電極の位置を付図-1~付図-10に示す。A, C, F, G, H港では通電試験後に肉厚測定を, B, D, E, I, J港では肉厚測定

後に通電試験を行った。調査陽極を切取ってから補助陽極から通電を開始するまでの時間, すなわち構造物の復極に要した時間は約12時間であった。

(4)水深



図一六 構造物の電位 (表一六の干潮時(1))

調査地点の水深をレッドで測定した。

(5) 観察

肉厚測定箇所(1)の構造物表面について、水中写真撮影(カラー)を付着物除去の前後に行った。

4.2 構造物の電位測定

構造物の電位測定結果を表一六に示す。

調査構造物の電位は $-800 \sim -1000$ mV(海水塩化銀電極基準)であった。鋼材の防食電位は -780 mV(海水塩化銀電極基準)であるから、調査構造物は何れも十分に防食されていることが認められた。深度方向の電位変化を眺めるために表一六の干潮時(1)の値を図示すると、図一六のとおりである。深度方向で電位変化が顕著なのはB、Fの2港であった。2港とも水面付近で電位が貴となっている。一方、深度方向で電位変化がほとんどみられないのはE、H、G、I、J港である。電位が $-900 \sim -960$ mVの範囲の構造物が多かったが、I、J港の電位は -1000 mVより卑であった。

電位測定するとき基準電極を保持する方法に、吊下げる方法(表一六の(1))と潜水夫が押しあてる方法(表一六の(2))がある。表一六で比較してみると両法による測定値間にはあまり差がなく、大きな差でも数10 mV程度の範囲である。干潮、満潮時の測定電位間にはJ港を除いてあまり差がみられなかった。ただ、J港では満潮時の電位

の方が干潮時の電位より約70 mV貴であった。J港は流速が大きく、干潮時に2ノット程度、満潮時に8ノット(最大)程度といわれる。腐食反応が拡散支配では、水流速が増すと腐食電流は増加する。この模様を付図一四に示す。流速が $V_1 < V_2 < V_3$ と増すと腐食電流は $i_1 < i_2 < i_3$ と増加する。このとき電位は $E_1 < E_2 < E_3$ と貴となる。付図一四でaをAl合金陽極のアノード分極曲線、cを構造物のカソード分極曲線とすると、J港で高流速のとき構造物の電位が貴となる現象が理解できる。Copsonの実験例によれば、海水中での鋼の電位に及ぼす流速の影響は海水の流速1 m/s当り、電位が約33 mVだけ貴になるといわれる⁶⁾。J港での干潮、満潮時の流速差が6ノット(≒3 m/s)であるから、Copsonの値を参照すると貴となる電位は約100 mVとなる。

静止海水中の鋼材の防食電位は -780 mV(海水塩化銀電極基準)であるが、流動海水中では防食電位が貴の方に变化する。例えば、攪拌溶液(pH=6)中では約 -570 mV(海水塩化銀電極基準)より卑であれば電防が達成されるといわれる⁷⁾。したがってJ港では構造物の電位が -1040 mV \rightarrow -970 mVに変化した。構造物は、防食範囲に保たれていることに変わりはない。

4.3 構造物の肉厚測定

構造物の現有肉厚測定値から腐食速度を算出すると、表一七のようになる。腐食速度は両面併せての値であるが、鋼矢板では海側の腐食速度、鋼管杭では外面の腐食速度を代表するとみなせる。調査構造物の腐食速度(平均)は $0 \sim 0.02$ mm/y程度であった。4.2の構造物の電位測定結果から構造物は十分な防食状態にあることが指摘されたが、肉厚測定結果はこのことを裏付けている。A港とJ港では、最大腐食速度が 0.1 mm/yを越えている箇所があった。J港では、電防と塗装(錆止め)が併用されたが写真一十を参照すると鋼材面に孔食が目立つ。これは、電防適用前に発生した塗膜の局部的劣化が孔食の一因ではないかと予想される。一方、A港では鋼材面に孔食が見られない(写真一参照)ので、付着物除去時に鋼矢板面に生じた傷跡等によることも考えられる。

4.4 通電試験

通電試験の結果を図一七に示す。横軸は通電用補助電極1個当りの発生電流であり、縦軸は構造物の電位(海水塩化銀電極基準)である。図中の各深度は基準電極の深度を示す。図一七によれば陰極(構造物)電位は通電量に大体比例しているが、C、D港の一部では直線的な変化ではない。また、直線関係であっても、H港とI港の

表一七 調査構造物の腐食速度

港名	深度 (m)	腐食速度 (mm/y)			港名	深度 (m)	腐食速度 (mm/y)			港名	深度 (m)	腐食速度 (mm/y)			港名	深度 (m)	腐食速度 (mm/y)		
		最大	平均	最小			最大	平均	最小			最大	平均	最小			最大	平均	最小
A	+0.4	0.057	0.025	0.014	C	-1	0.050	0.025	0.017	D	+0.6	0.023	0.005	H	-6	0.065	0.034	0.009	
	+0.2	0.071	0.034	0.014		-2	0.033	0.019	0.017		+0.4	0.023	0.005		0	-7	0.056	0.038	0.009
	±0	0.086	0.038	0.014	海泥中	0.050	0.028	0.017	+0.2		0.023	0.005	0		-8	0.065	0.036	0.028	
	-0.5	0.129	0.032	0	+1	0.053	0.028	0.001	±0		0.023	0.006	0		-9	0.047	0.023	0	
	-1	0.086	0.035	0	+0.8	0.040	0.013	0	-0.5		0.034	0.012	0		海泥中	0.037	0.016	0	
	-2	0.143	0.041	0	+0.6	0.052	0.025	0.002	-1		0.023	0.012	0		+1	0.063	0.034	0.018	
	-3	0.143	0.040	0.014	+0.4	0.050	0.028	0.001	-2		0.023	0.009	0		+0.8	0.056	0.034	0.015	
	-4	0.071	0.037	0.014	+0.2	0.052	0.026	0	海泥中		0.034	0.014	0		+0.6	0.063	0.041	0.020	
	-5	0.071	0.040	0	±0	0.042	0.025	0	+0.2		0.016	0.008	0		+0.4	0.044	0.030	0.011	
	-6	0.086	0.047	0.014	-0.5	0.057	0.040	0.021	±0		0.016	0.008	0		+0.2	0.053	0.026	0.001	
B	-7	0.100	0.045	0.014	-1	0.038	0.020	0	-0.5	0.008	0.004	0	±0	0.054	0.033	0.019			
	-8	0.114	0.043	0.014	-2	0.031	0.018	0.003	-1	0.016	0.005	0	-0.5	0.058	0.041	0.019			
	-9	0.071	0.050	0.019	-3	0.041	0.021	0	-2	0.016	0.008	0	-1	0.076	0.035	0.007			
	海泥中	0.071	0.052	0.014	-4	0.039	0.021	0	-3	0.016	0.008	0	-2	0.051	0.029	0.005			
	+1	0.064	0.037	0.007	-5	0.039	0.023	0	-4	0.016	0.010	0	-3	0.070	0.039	0			
	+0.8	0.047	0.033	0.013	海泥中	0.017	0.009	0	-5	0.016	0.010	0	-4	0.073	0.039	0.006			
	+0.6	0.046	0.032	0.014	+1	0.031	0.018	0	-6	0.023	0.015	0.008	-5	0.048	0.028	0.014			
	+0.4	0.046	0.031	0.011	+0.8	0.038	0.019	0	海泥中	0.016	0.008	0	-6	0.063	0.033	0.005			
	+0.2	0.031	0.025	0.016	+0.6	0.036	0.021	0	+1.4	0.037	0.031	0.028	-7	0.061	0.034	0.004			
	±0	0.049	0.030	0.021	+0.4	0.036	0.021	0	+1.2	0.044	0.033	0.028	海泥中	0.055	0.025	0			
C	-0.5	0.036	0.027	0.019	+0.2	0.038	0.015	0	+1.0	0.074	0.039	0.028	-4	0.050	0.036	0			
	-1	0.019	0.011	0.007	±0	0.031	0.009	0	+0.8	0.056	0.031	0.009	-5	0.063	0.033	0			
	-2	0.017	0.014	0.010	-0.5	0.038	0.019	0	+0.6	0.037	0.033	0.028	-6	0.070	0.043	0.016			
	-3	0.027	0.023	0.020	-1	0.036	0.024	0.010	+0.4	0.037	0.029	0.019	-7	0.081	0.054	0.021			
	-4	0.057	0.034	0.016	-2	0.035	0.017	0	+0.2	0.047	0.034	0.009	-8	0.106	0.050	0.007			
	-5	0.070	0.053	0.039	-3	0.038	0.022	0.003	±0	0.075	0.040	0.028	-9	0.113	0.084	0.056			
	-6	0.046	0.029	0.014	-4	0.035	0.023	0.001	-0.5	0.047	0.031	0.028	-10	0.120	0.084	0.061			
	-7	0.059	0.037	0.020	-5	0.035	0.020	0	-1	0.056	0.029	0.019	-11	0.124	0.074	0.026			
	+0.4	0.033	0.027	0.020	-6	0.038	0.023	0.005	-2	0.037	0.029	0.019	-12	0.127	0.061	0			
	+0.2	0.050	0.033	0.017	-7	0.035	0.024	0	-3	0.037	0.024	0.009	海泥中	0.117	0.069	0.014			
±0	0.017	0.017	0.017	海泥中	0.036	0.020	0	-4	0.037	0.021	0.019								
-0.5	0.050	0.031	0.017					-5	0.037	0.027	0.009								

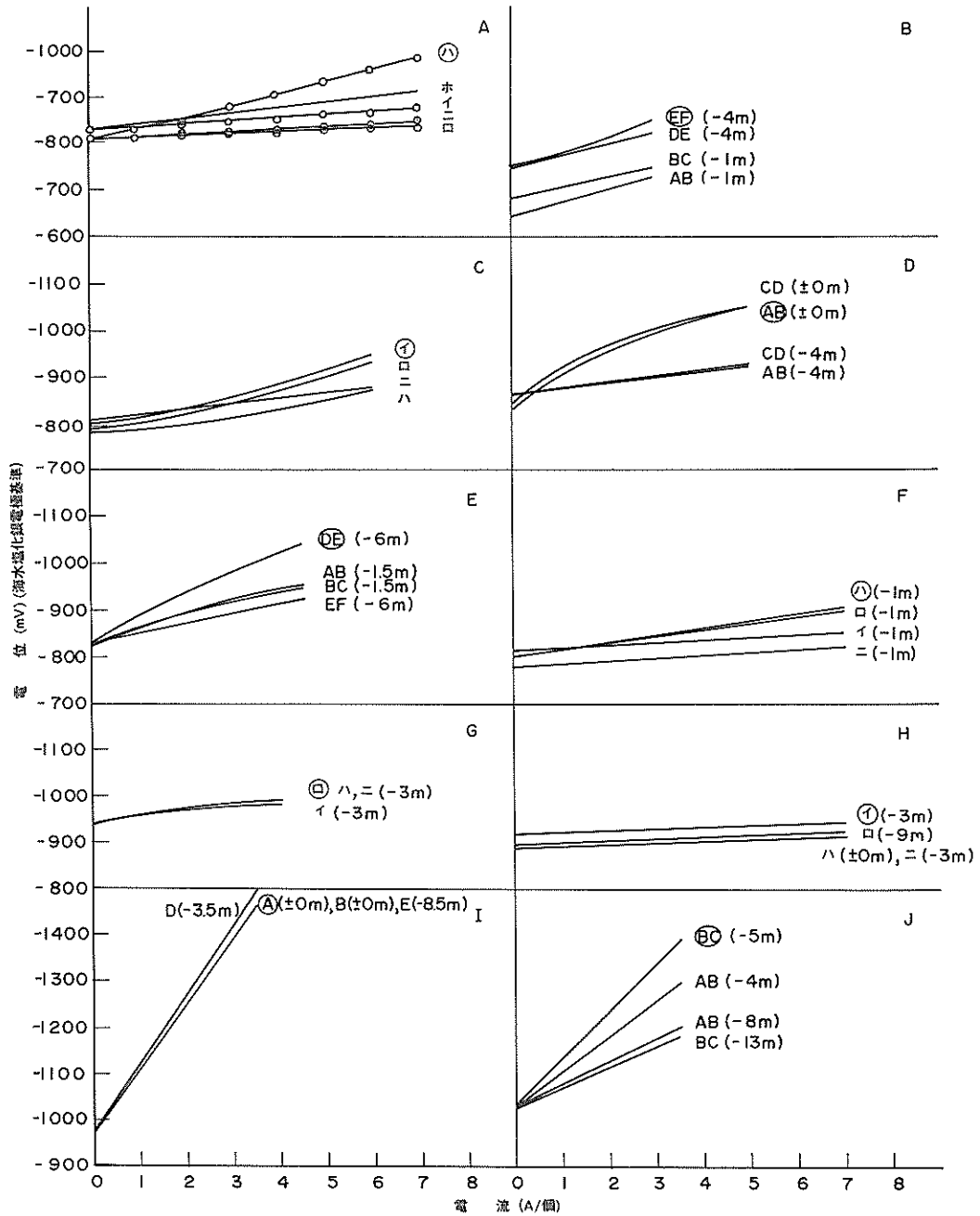
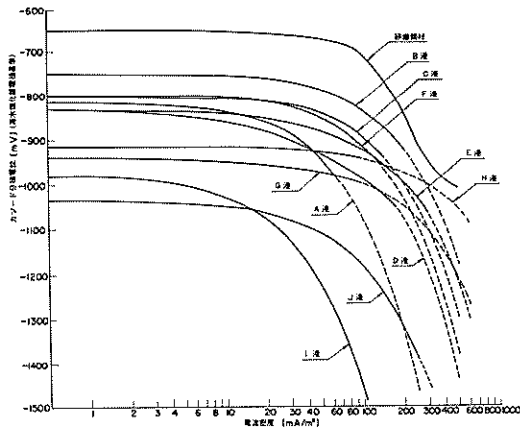


図-7 陰分極試験結果

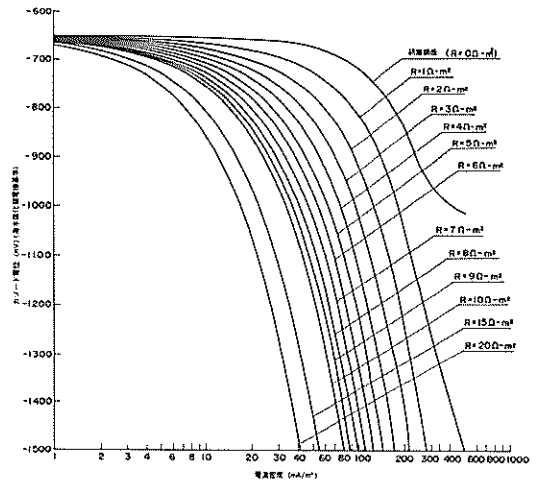
ように場所によって傾斜が異なるケース，J港のように同一場所であっても水深によって傾斜の異なるケース等がある。

各港の1例(図-7の○印)について横軸に電流密度(mA/m²)，縦軸に陰極(構造物)電位(mV)をと

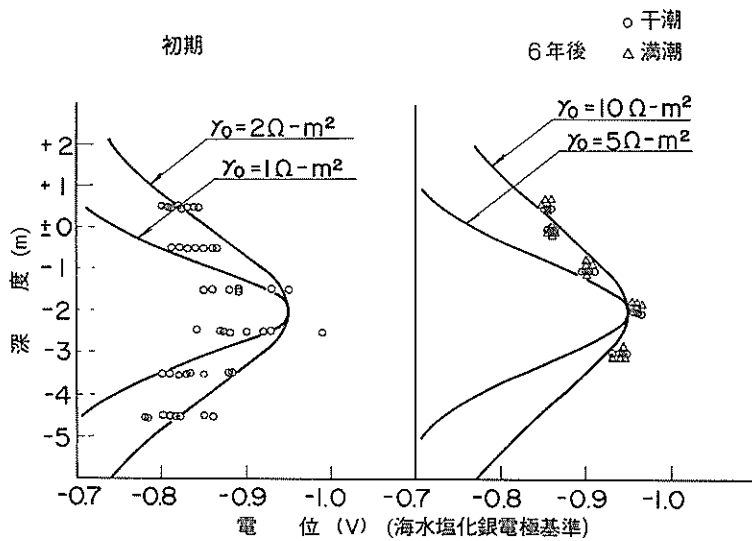
って図示すると，図-8 のようになる。図中に参考として海中における研磨鋼材片の陰分極曲線を示す。比較のために，鋼材の表面抵抗が0~20Ω・m²の範囲のときの海中の陰分極曲線を推定すると図-9 のようになる。図-8 の各港の曲線は図-9 と異なり，小電流密度



図—8 調査港の陰分極曲線



図—9 鋼材の陰分極曲線



図—10 電位分布の傾向 (C港)

のときでも -700 mV より卑な値である。この差異の原因として、次の2点が考えられる。

①海水中で鋼材を電気防食すると、鋼材面は石灰質皮膜（炭酸カルシウム+水酸化マグネシウム）で覆われる。石灰質皮膜はアルカリを含有するので、防食電流が中断されても相当の期間にわたって金属面を防食する性能をもっているといわれる²⁾。したがって、通電量が零となっても長期にわたって陰分極が残ることになる。例えば、4日間通電して約 -870 mV まで分極した陰極電位は12

日間の不通電で約 -760 mV までしか復極しなかったといふ⁸⁾

②調査陽極を切取っても残りの陽極から防食電流が流入することが考えられる。もし、他から防食電流の流入があれば、補助電極からの通電量が零であっても構造物面に陰分極が残ることになる。

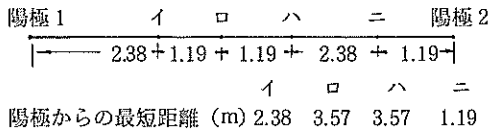
図—8で電流密度が大きくなると図—9に類似した鋼材の表面抵抗の影響がみられる。

電位分布式からC港について、初期と6年後の電位測

表—8 水深測定結果

港名	測定水深 (m)							設計水深 (m)
	A	B	C	D	E	F	平均	
A 港	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-9.7	-10.0	-10.0	-10.0
B 港	-7.4	-7.5	-7.7				-7.5	-7.5
C 港	-2.8	-2.7	-2.5	-2.5			-2.6	-4.5
D 港	-5.8	-5.8	-6.0	-6.0			-5.9	-5.5
E 港	-7.5	-7.2	-7.3				-7.3	-7.5
F 港	-2.8	-2.8	-2.5	-2.5			-2.7	-4.0
G 港	-7.7	-8.0	-7.7	-8.0			-7.9	-9.0
H 港	-10.5	-10.0	-10.0				-10.2	-10.0
I 港	-8.5	-8.5	-8.5				-8.5	-10.0
J 港	-12.5	-13.0	-13.0				-12.8	-14.5

定値と推定値を比較してみると、図—10 のようになる。初期の電位分布は鋼材の表面抵抗を $1 \sim 2 \Omega \cdot \text{m}^2$ と仮定したときの推定値と一致するが、6年後では表面抵抗を $10 \Omega \cdot \text{m}^2$ 程度のときの計算値と一致する。図—10では表面抵抗が $10 \Omega \cdot \text{m}^2$ のとき -800 mV の範囲は陽極から $3 \sim 4 \text{ m}$ である。図—8によれば、C港では通電量が0のときの構造物電位は -800 mV である。付図—3から基準電極と近接陽極間の距離を求めてみると、C港では電位測定箇所は何れも残留陽極からの最短距離は 4 m 未満である。



この結果、通電試験で通電量を0にしても残留陽極からの防食電流が流入していることになる。なお、図—10ではC港の表面抵抗(6年後)は約 $10 \Omega \cdot \text{m}^2$ と推定されたが、図—8では $< 10 \Omega \cdot \text{m}^2$ のようである。図—8から表面抵抗を正確に求めることは無理であるが、表面抵抗の大小のグループに類別することはある程度可能と考えられる。

4.5 構造物の水深測定及び観察

(1) 水深測定

調査箇所的水深測定結果を表—8に示す。C、F、G、I、J、港では設計水深より浅くなっており、D港では多少深くなっている。水深変化に伴って防食面積が変

化するので、水深変化は防食電流密度に影響する。表—4の防食電流密度(2)、(3)は水深変化を考慮した値である。便宜上、初期の防食面積を用いて算出した防食電流密度(表—4の防食電流密度(1))の値が求められることが多いが、正確には防食電流密度(2)、(3)の値を求めべきである。水深変化による防食電流密度の変動幅は構造形式によって様ではないが、表—4では、水深が $1 \sim 2 \text{ m}$ 浅くなったとき防食電流密度は $5 \sim 10 \text{ mA} / \text{m}^2$ 増大した。今回の水深測定は調査箇所についてのみ行ったものであるから、構造物全体についての防食電流密度を対象とするならば全延長について水深測定をする必要がある。

(2) 観察

調査構造物の観察結果を写真—1～写真—10に示す。各港の鋼材面は各水域の海洋生物に覆われている。A港等では鋼材面はフジツボ、カキ等が固着しているが、B、E港等ではシライトゴカイ等が付着している程度に過ぎない。海洋生物を除去した鋼材面は平滑で発錆していないところがほとんどであるが、J港のみは鋼材面の孔食が目立った(写真—10参照)。

5. 環境調査

5.1 調査方法

(1) 水質試験

各港のC地点(付図—1～付図—10参照)において、上、中、下の3深度から干潮時及び満潮時に採水した。

試水の分析項目は次のとおりである。

①水温 ②pH ③酸化還元電位 ④比抵抗

⑤塩素イオン ⑥溶存酸素 ⑦COD

⑧アンモニウムイオン ⑨硫酸イオン

⑩硫酸塩還元菌菌体数 ⑪懸濁物質

分析は腐食防食協会8・1分科会の水質分析の方法によった。

①～⑥の項目については現地で試験を行い、⑦～⑪の項目については試水を持ち帰り室内で試験した。

(2) 底質試験

調査地点Cの海泥表層より採泥した。ただし、J港は海泥が存在しなかったので採泥したのはA～Hの9港である。

採泥した試料の分析項目は次のとおりである。

①温度 ②pH ③COD ④硫酸塩還元菌菌体数

⑤硫化物

分析は腐食防食協会8・1分科会の底質分析の方法によった。①～②の項目については現地で試験し、③～⑤の項目については試料を持ち帰り室内で試験した。

5.2 水質試験

表層水、中間水、海底水の水質試験結果を付表—2～付表—4に示す。この中、①～③の項目について結果を図示すると図—11のようになる。海水の水質については、例えば、「海水は空気を飽和しており酸素濃度は水温により大体5～10ppmの範囲で変わり、またpHは通常8.1～8.3であるが、これらの数値は深度とともに当然変化する。また植物が極端に繁茂すると、炭酸ガスが減少し、溶存酸素は飽和濃度を10～20%も上まわり、pHが9.7に近づくこともある。嫌気性細菌の繁茂する場合は、溶存酸素量が低下し、硫化水素が含有されるとともにpHも7程度に低下する。」といわれる⁹⁾。このことから、溶存酸素とpHは海水の変質を判断するのに都合のよい指標の一つかとみられる。腐食防食協会8・1分科会では、鋼材の腐食防食に影響しそうな要因として先に示した①～⑪の項目を水質試験の対象として取り上げた。表層水と海底水の分析例を付表—2、4に示した。分析例を参照するとB、E港等の海水は各項目について次のような傾向があるといえる。

項目	A, J港等	B, E港等	A, J港等	B, E港等
pH	大 → 小	小 → 大	COD	小 → 大
酸化還元電位	大 → 小	小 → 大	アンモニウムイオン	小 → 大
比抵抗	小 → 大	大 → 小	硫酸イオン	小 → 大
塩素イオン	大 → 小	小 → 大	硫酸塩還元菌	小 → 大
溶存酸素	大 → 小	小 → 大		

(1) 水温

海水の分析例は8月の試験値のため、水温が22～26℃と高い。試験海水は10月～12月にかけて採水されたので、10～24℃の範囲であった。参考として、年間水温の代表例を付図—13に示す。A港は北海道に位置するので水温が最も低かった。水温の高低によって海洋生物の種類等が影響を受けることの外、比抵抗、溶存酸素等のように水温によって変動する項目がある。したがって、水質試験結果をみると、水温による変動率の大きい項目では水温差による補正をして試験結果を解釈する必要がある。付図—14に比抵抗と溶存酸素量の温度変化を、付図—15に水温によるpH変化を示す。

(2) pH

付図—14によれば、10℃の温度上昇によってpHは約0.4低下する。この関係を参照して20℃における各港のpHを比較するとpHが8程度のところが多いが、B、C、E、F港ではpHが7.8～8.0とやや低い。

(3) 酸化還元電位

微生物の作用と酸化還元電位の関係を付図—16に示す。調査港の酸化還元電位はほとんど+350mVより貴であり、僅かにB港(干潮時)で+200mV、E港(干潮時)で+300～+350mV程度である。防食電流密度(電流測定)はE港、B港で50mA/m²以上であったことから、酸化還元電位は防食電流密度に対する環境要因の一つかと思われる。付図—16を参照すると、調査港の海水は何れも好気性雰囲気である。

(4) 比抵抗

図—11のB、D、E、I、J港の比抵抗値は25℃での値に換算されている。付図—14を参照すると水温10℃の上昇により比抵抗は4～5Ω-cm小さくなる。この関係から残りの港の比抵抗値も25℃での値に換算して比較すると、A、B、H、I、J港では25Ω-cm程度であったが、C、D、E、F、G港では25～30Ω-cm程度であった。

(5) 塩素イオン

C、F、G、H港での塩素イオン量は他港に比べて少なく、淡水の流入が予想される。G港での塩素イオン量は干潮時と満潮時で差があり、干潮時表層水は約12‰と最低であった。

(6) 溶存酸素

付図—14の溶存酸素量と水温の関係を用いて調査港の溶存酸素量を20℃の値に換算して比較すると、B港では3～4ppm、D港では3～6ppm(干潮時は3～5ppm)、E港では5～7ppmと溶存酸素量が少なかった。反対にJ港では11ppm、I港では10ppmと溶存酸素

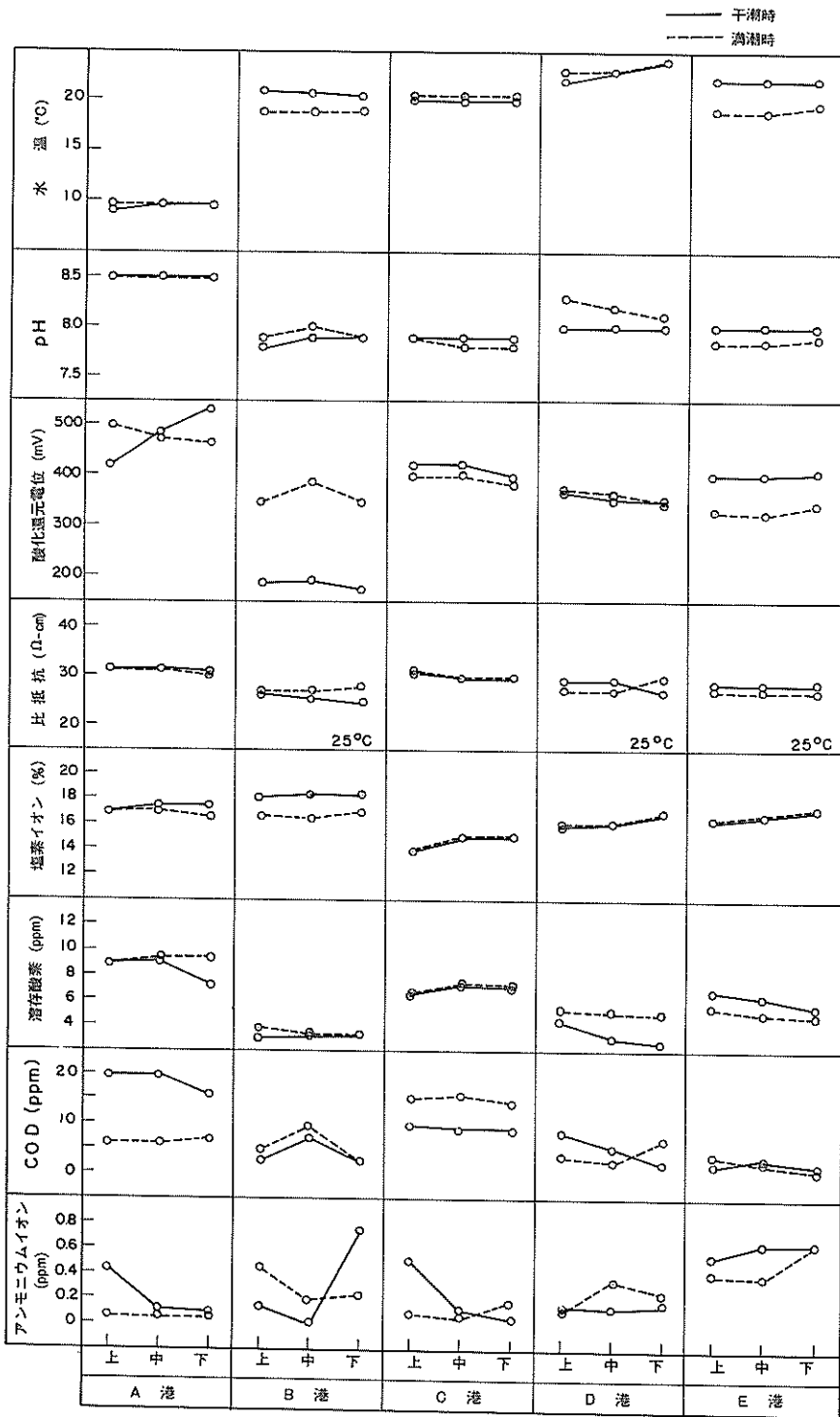
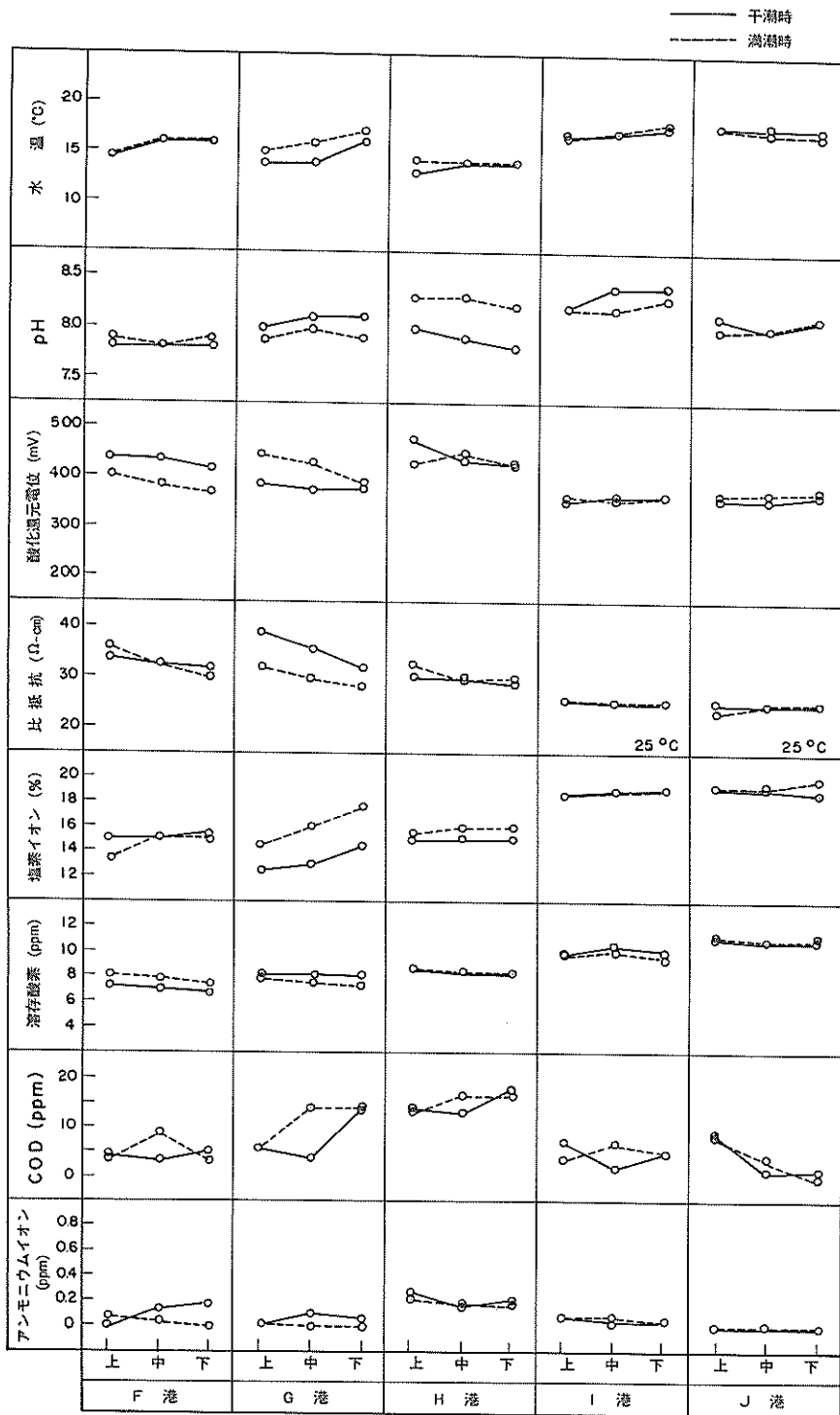


図-11 水質試験結果(1)



図—11 水質試験結果 (2)

素量は大きく、残りの港での溶存酸素量は7~8 ppm程度であった。ただし、A港干潮時の海底水の溶存酸素量は6 ppmと小さかった。

防食電流密度(電流測定)が50mA/m²のところはB, Eの2港であり、45mA/m²以上のところはB, D, Eの3港であった。溶存酸素量はB, E2港で特に少なく、次いでD港で少なかった。これに対し、溶存酸素量が7 ppm以上のところでは防食電流密度(電流測定)は30mA/m²程度またはこれ以下であった。したがって、溶存酸素量は防食電流密度の大小に関係する環境要因の一つと考えられる。

(7) COD

A港(干潮時), C港(満潮時), G港(満潮時—中間水と海底水), H港でのCOD量が大きく14~20 ppmであった。反対にCOD量が10 ppm以下のところは、A港(満潮時), B港, C港(干潮時), D港, E港, F港, G港(干潮時—表層水, 中間水, 満潮時—表層水), I港, J港であった。

(8) アンモニウムイオン

アンモニウムイオン量はE港では全般に0.4~0.6 ppmと大きかったが、反対にF, G, I, J港では0~0.2 ppmと小さかった。残りの港でのアンモニウムイオン量は0.2~0.4 ppm程度であったが、A港(干潮時—表層水), B港(干潮時—海底水, 満潮時—表層水), C港(干潮時—表層水)では0.4 ppmを上廻った。防食電流密度(電流測定)はE港が最も大きく72mA/m², 次いでB港の65mA/m²であった。アンモニウムイオン量はE港で最大であり、次いでB港で大きかった。このことからアンモニウムイオンも防食電流密度に関係する環境要因の一つとみられる。

(9) 硫黄イオン

硫黄イオンはA, C港で最も多く検出された(付表—2~付表—4)。C港では塩素イオン量が少なかったことから河川水等による海水の希釈が予想されるが、A港では他の試験項目では自然海水とみられる。海水の環境要因として硫黄イオンが指摘されることが多いようであるが、今回の調査でははっきりしなかった。海水中の硫黄イオンの分析は難しいのでA港のような矛盾は海水中の硫黄イオンの分析精度に関係するかもしれない。

(10) 硫酸塩還元菌

海水中に硫酸塩還元菌が検出されたのはA, C, D, F, G, Hの6港であった。この中、A港では1もしくは1以下(菌数/ml)で極く微量に過ぎなかった。D, F, G, H港では中間水, 海底水の方が表層水より菌体数は増加する傾向がみられ、特に、D港では表層水, 中

間水に比べて海底水の菌体数が急増した。しかし、C港では、表層水の方が菌体数が多いケースもあって深度と菌体数の関係ははっきりしない。海水中で菌体数が最も大きかったのはD港の海底水(干潮時)で、菌体数は約10³(個/ml)であった。一方、硫酸塩還元菌が検出されなかったのはB, E, I, J, の4港であった。硫酸塩還元菌は嫌気性条件下で腐食をおこす特長があり、腐食に対して果す役割は①腐食反応によって生ずる水素を酸化して復極をおこすこと、②その結果発生する硫化水素が鉄と反応してさらに腐食をすすめることである。すなわち、酸素がなくても腐食は進行するといわれる¹⁰⁾。環境が好気性か嫌気性を判定する酸化還元電位の測定結果を参照すると、調査10港の海水は好気性と判定された(図—11, 付図—16)。また、10港の中、酸化還元電位が比較的低かったのはB, E港であった。防食電流密度が大きかったのはB, E港であり、I, J港では小さかった。このこととは硫酸塩菌菌体数の多少と一致しない。したがって、硫酸塩還元菌の分析精度が上記の矛盾に関係しているのではないかと思われる。

(11) 懸濁物質

J港以外のところでは懸濁物質が検出された。J港で懸濁物質が検出されなかったのは高流速に起因するであろう。検出された9港の中、検出量が1 ppm以下であったのはB, E, Iの3港であり、検出量が最大であったのはD港の海底水(干潮時)の50ppmであった。表層水より中間水と海底水の方が懸濁物質が多い傾向はA, C, D, F, G, Hの6港でみられた。特に、D港では表層水, 中間水に比べて海底水の懸濁物質が急増した。

5.3 底質試験

底質試験結果を表—9に示す。海泥の温度は水温と大差なかった。海泥のpHは6.9~7.7の範囲にあり、海水のpHに比べて0.2~1.0程度小さかった。海泥の酸化還元電位はI港を除いて-70~-170 mVの範囲にあり、このことからA, B, C, D, E, F, G, H港の海泥はいずれも嫌気性環境とみられる(付図—16参照)。I港の酸化還元電位は+58 mVで好気性環境と嫌気性環境の境界付近に位置する。海泥中のCOD量は(1~5) × 10⁴ ppmの範囲のところが多かったが、D港のみは2 × 10³ ppmと最も少なかった。海水中のCOD量は20 ppm以下であるから(図—11参照)、海泥中のCOD量は海水中のCOD量に比べてD港でも10²倍以上、H港で2 × 10³倍以上となる。硫酸塩還元菌はA~I港で検出され、その量は7 × 10²~1 × 10⁶(菌数/ml)であった。この中、含有量の多かったところはB, D, E

表—9 底質試験結果

試験項目	A港	B港	C港	D港	E港	F港	G港	H港	I港
温度 (°C)	9.7	20	20	24	19.5	17	16.2	13	18.8
pH	7.7	6.9	7.7	7.1	7.6	7.1	7.3	7.5	7.7
酸化還元電位 (mV)	-84	-142	-74	-120	-73	-165	-168	-71	+58
C O D (ppm)	32600	47000	9420	4200	12700	26700	39500	53900	21100
硫酸塩還元菌 菌体数 (菌数/ml)	9.8×10^2	1.4×10^6	1×10^3	1.1×10^6	1.1×10^6	9.2×10^3	7.4×10^2	6.9×10^2	1.1×10^4
硫化物 (ppm)	5382	4.2	264	2	1.5	1360	874	2307	1.6

の3港で 10^6 (菌数/ml)の桁であり、少なかったところはA, C, G, Hの4港で含有量は 10^3 (菌数/ml)程度であった。海泥中の硫酸塩還元菌菌体数が多かったB, D, Eの3港では、海水中の硫酸塩還元菌はD港の海底水を除いて検出されなかった。しかし、検出されたD港の海底水中の菌体数は検水中で最大であった。海水中の菌体数が海泥中の菌体数にあまり相関性がみられないのは、海水中の硫酸塩還元菌の分析精度や採水が一期間のみであったこと等に一因があるのではないと思われる。海泥中の硫酸塩還元菌菌体数が多かったB, D, Eの3港では、海水中の溶存酸素量が少なかった。したがって、海泥中の硫酸塩還元菌菌体数の多いところほど自然海水ではない傾向が予想される。硫化物量はB, D, E, I港では10 ppm以下、C港では 3×10^2 ppm, G, F, H, A港では $(1 \sim 5) \times 10^3$ ppmであった。硫化物濃度は、硫酸塩還元活性の蓄積量ともいわれるが、硫酸塩還元菌菌体数との相関性はあまりみられない。これは、底質中では硫化物はかなり固定された状態にあることに関係するのかもしれない。

6. 結論

上記の電防調査結果の範囲から、次のことがいえる。

(1) 防食電流密度は表—10のとおりである。自然海水の中では、防食電流密度は経時的に減少して初期値の半分または半分以下となるのが一般的である。防食電流密度が初期値の50%以下のところは、重量測定ではA, D, F, G, I, Jの6港(この中、G, I, Jの3港では30%程度)であり、電流測定ではA, C, D, F, G, H, I, Jの8港(この中、A, C, F, H, I, Jの6港では30%程度、G港では10%程度)であった。

(2) 防食電流密度が初期値の50%以上のところは、重量測定ではB, C, E, Hの4港、電流測定ではB,

Eの2港であった。

(3) 防食電流密度(電流測定)が 45 mA/m^2 以上であったB, D, E港では、他港に比べて溶存酸素量が少なく水温が高い傾向があった。 50 mA/m^2 以上のB, E港では、他港に比べてさらにアンモニウムイオン量が多く酸化還元電位が低い傾向がみられた。

(4) B, E港では防食電流密度の経時的低減率が50%以下にならなかった。陽極寿命を算定するときの平均防食電流密度を初期値の50%とみなすならば、防食電流密度(初期)を設計値より引上げる必要がある。電防設計の目安からみて、妥当な防食電流(初期)はB港では 130 mA/m^2 程度、E港では 140 mA/m^2 程度となる。

(5) 防食電流密度(重量測定)の方が防食電流密度(電流測定)より大きい傾向がA, C, F, G, H港でみられた。この原因として、防食電流が経時的に減少して安定値に達するまでに長時間要したため、調査期間までの平均防食電流値が大きくなったこと等が予想される。反対に、B港の防食電流密度は電流測定の方が重量測定より多少大きかった。これは陽極表面の付着物除去の不十分さが一因かと思われるが、判然としない。

(6) 陽極寿命の推定値を表—10に示す。陽極の低減率が50%以上では推定寿命は設計寿命に不足するが、このケースは重量測定ではB, C, D, E, F, Hの6港、電流測定ではB, D, E, Hの4港であった。陽極寿命の推定は防食電流の平均値によるのが妥当であり、長期的には電流測定による値に近似する。電流測定からの推定寿命が設計寿命に不足したB, D, E, H4港の中、H港はほぼ自然海水とみられる。H港で陽極寿命の不足が推定されたのは、陽極個数の不足(表—1参照)のため陽極1個当りの負担が大きくなったこと、潮位間での波浪の影響を最も受けやすかったこと等によるのではないと思われる。

表—10 陽極調査結果

港名	鋼材	M.S.L (m)	被覆	防食電流密度 (mA/m ²)				陽極寿命 (年)				
				初期	重量測定 ¹⁾	電流測定 ¹⁾	電流測定 ²⁾	設計値	推定値		過不足	
									重量測定	電流測定	重量測定	電流測定
A	鋼矢板	+1.01	コンクリート +0.5m上	100	42	33	32	30	36.2	45.3	+ 6.2	+15.3
B	鋼管矢板	+1.23	コンクリート +1.0m上	100	53	65	61	10	9.7	9.1	- 0.3	- 0.9
C	鋼管矢板	+1.15	コンクリート + 0.5m上	120	72	28	36	20	16.9	33.5	- 3.1	+13.5
D	鋼矢板	+1.42	コンクリート +1.0m上	115	49	45	44	20	18.2	18.9	- 1.8	- 1.1
E	鋼矢板 セル	H.W.L (+1.42)	コンクリート +1.0m上 錆止め +0.5m上	110	76	72	73	20	14.6	15.0	- 5.4	- 5.0
F	鋼矢板	+1.18	コンクリート +0.7m上 塗 -0.5m上	101	43	25	21	20	18.1	24.7	- 1.9	+ 4.7
G	鋼管杭	+0.12	コンクリート +0.3m上	102	29	11	12	10	15.8	20.1	+ 5.8	+10.1
H	鋼矢板 (組合せ式)	+1.99	コンクリート +1.5m上	100	62	29	32	25	16.0	21.9	- 9.0	- 3.1
I	鋼管杭	H.W.L (+1.70)	コンクリート +2.5m上 塗 -1m上	110	28	29	40	20	40.1	38.1	+ 20.1	18.1
J	橋脚外 板	+1.55	錆止め	102	31	30	34	20	65.1	68.4	+ 45.1	+48.4

1) 全発生電流+ 全防食面積 (初期)

2) 調査範囲についての発生電流+ 防食面積 (現在)

(7) J港は2~8ノット(1~4m/s)の高流速の環境であるが、高流速に対する防食電流密度の引上げの配慮は必要ではなかった。これはJ港において錆止め塗装が施されたこと、自然海水のため防食皮膜が十分に生成したこと、波浪の影響を受けやすい潮位間に鋼材が存在しなかったこと等によるものと考えられる。

(8) E, F, I, J港では、塗装が構造物の一部(E, F, I港)または全面(J港)に適用された。これに対して、E港では陽極寿命が設計値に不足し、J港では陽極の推定寿命は設計値の約3倍と長くなったが孔食が著しく発生した。J港の孔食は塗膜の局部的劣化(電防開始前に発生)によるのではないかと推察される。

(9) 通電試験のために調査陽極(4~6個)を切取ったところ通電量が0のときでも構造物の電位は完全には自然電位に戻らなかった。これは残留陽極からの防食電流の流入や防食皮膜の防食性能の持続等によるものと思われる。通電試験結果からカソード分極曲線を求めてみると、防食電流密度の経時低減が著しい構造物では表面抵抗が大きい傾向が見受けられる。(図—8参照)。

(10) AI合金陽極を流電陽極として使用するとき、陽極表面を覆う腐食生成物のため陽極電位は貴となるが、電位上昇の範囲は小さい程防上好ましい。調査港では腐食生成物除去前後の電位差は100mV以下のところが多く、中でもJ港では40mV程度、H港では20mV程度と小さかった。反対に、B港では130mV程度、E港では110mV程度と大きかった。

(11) 調査10港の構造物の電位はいずれも防食電位(-780mV、海水塩化銀電極基準)より卑に保たれており、また、構造物(海中部)の腐食速度は0~0.02mm/yの範囲であった。したがって、調査10構造物は十分に防食されているといえる。

(12) 溶存酸素量が多かったA, I, J港における陽極の方が溶存酸素量が少なかったB, D, E港における陽極より表面の凹凸が小さい傾向がみられた。

(13) 海水中の硫酸塩還元菌菌体数は防食電流密度に影響するはっきりした環境要因ではなかったが、海泥中の硫酸塩還元菌菌体数は要因の一つではないかと思われる。

(14)(3),(13)より防食電流密度に影響する環境要因として、海水中の溶存酸素、アンモニウムイオン、水温、酸化還元電位、海泥中の硫酸塩還元菌等が指摘される。

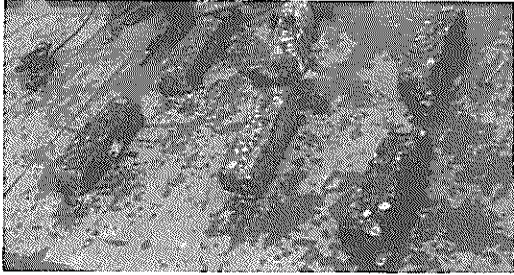
あとがき

流電陽極方式の電気防食が適用されて6年～13年経過した10構造物について防食調査を行なった。調査の結果、港湾構造物の電防の設計・管理に役立つ上記の資料を得たが、何分にも今回の調査は限られた構造物についての1時点のものであったから、今後の調査・検討にまっ点も少なくない。例えば、防食電流密度に対して海水中の溶存酸素やアンモニウムイオンのような環境要因が指摘されたが、さらにこの点に関する資料を収集して検討する必要がある。このような資料の収集により、環境要因の外、陽極特性、地域特性、構造物特性等についても検討が可能となろう。また、今回の通電試験を開始するとき構造物表面の電位が完全には自然電位に戻らなかったため、今後の調査ではこの点についての工夫が必要である。

最後に調査に御協力頂いた関係機関の方々に厚く御礼申し上げます。また、本調査報告の取纏めに関して有益な御意見を頂きました小林豊治氏（日本防蝕工業KK）に感謝の意を表します。

参考文献

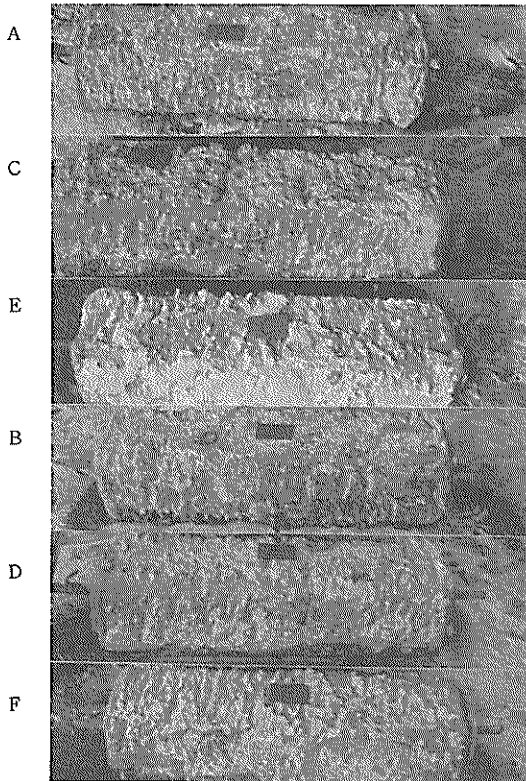
- 1) 運輸省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会発行、1979年、p. 3～15.
- 2) 日本学術振興会：金属防蝕技術便覧、日刊工業新聞社発行、1972年、p. 580.
- 3) 2), p. 581.
- 4) Mackay, W. B. : Deep water testing of sacrificial anodes (Part 2), Material Performance, 1975, pp. 39～43.
- 5) 伊藤伍郎：腐食科学と防食技術、コロナ社発行、1971年、p. 90.
- 6) Copson, H.R. : Effects of velocity on corrosion, Corrosion, 1960年, vol. 16, No. 2 86 t - 92 t .
- 7) Kobayashi, T. : Effect of environmental factors on the protective potential of steel, Proc. 5th Inter. Congr. Met. Corr., 1972年, pp. 627 ~ 630.
- 8) 鈴木他：バラストタンクの電気防食における所要防食電流、腐食防食協会春季学術講演予稿集、1979年、pp. 183 ~ 184 .
- 9) 2), p. 177 .
- 10) 2), p. 224.



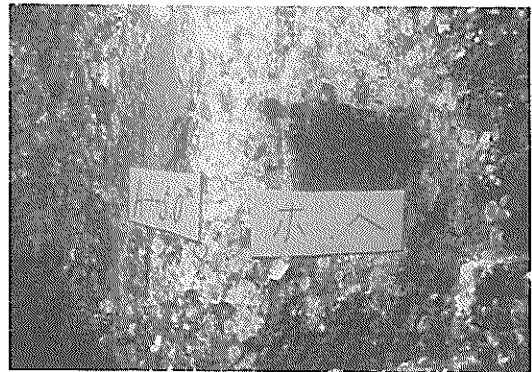
陽極（回収時）



鋼矢板 ± 0m

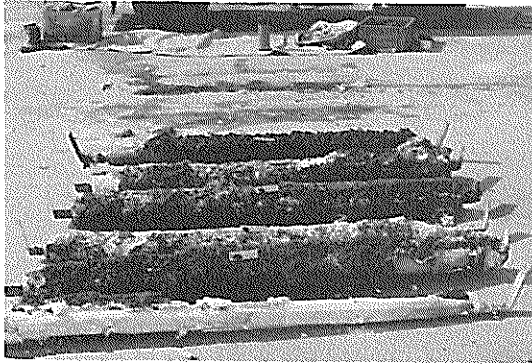


陽極（付着物除去後）
（整理上、写真中の符号と異なる）



鋼矢板 - 5m

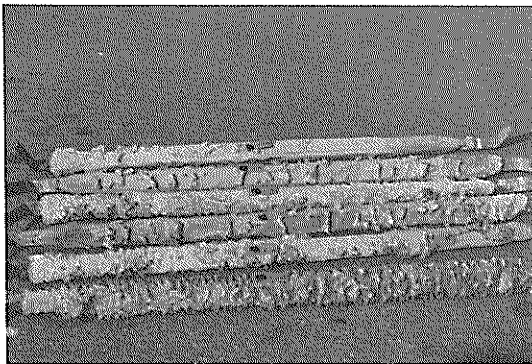
写真—1 A港における陽極および鋼矢板面



陽極（回収時）



鋼管矢板 - 1 m



陽極（付着物除去後）
上からD, A, E, C,
F, B



鋼管矢板 - 6 m

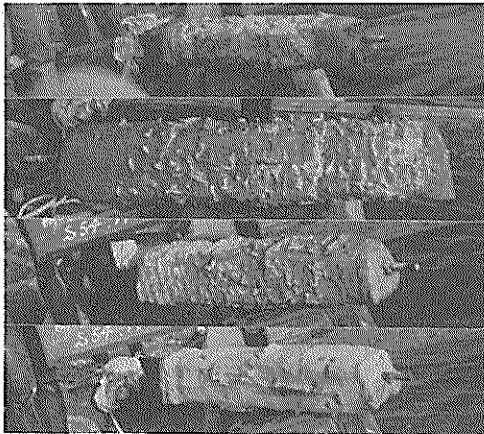
写真—2 B港における陽極および鋼管矢板面



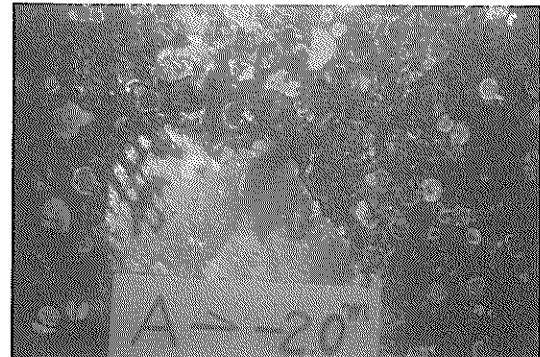
陽極（回収時）



鋼管矢板 +0.4 m

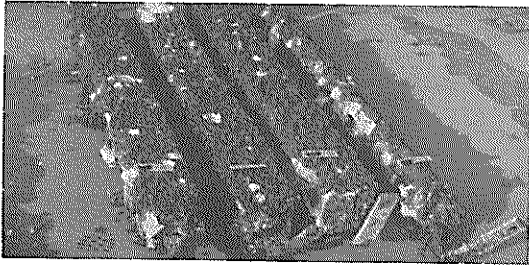


陽極（付着物除去後）

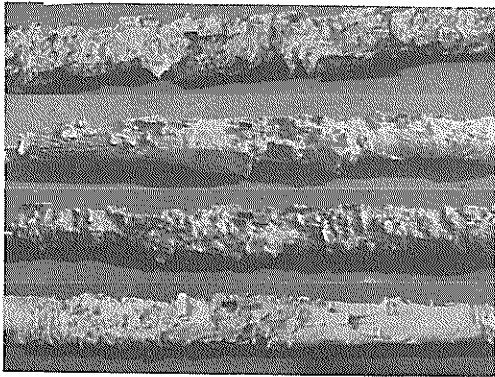


鋼管矢板 -2 m

写真—3 C港における陽極および鋼管矢板面



陽極（回収時）



陽極（付着物除去後）



鋼矢板 + 1 m



鋼矢板 - 2 m

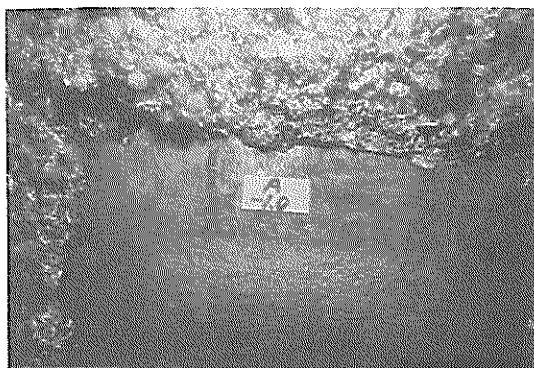


鋼矢板 - 4 m

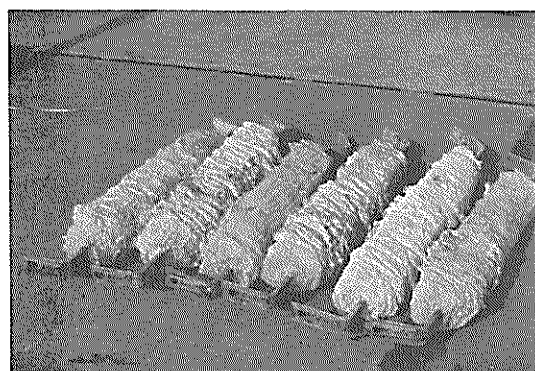
写真—4 D港における陽極および鋼矢板面



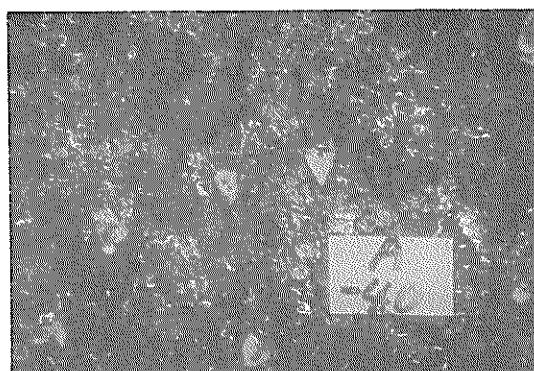
陽極（回収時）
上からD, A, E, B, C, F



鋼矢板 - 1m



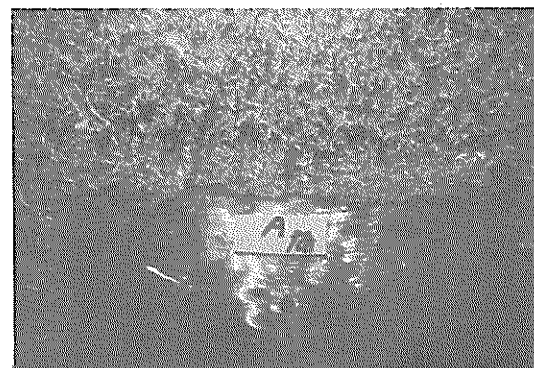
陽極（付着物除去後）
左からD, A, E, B, C, F



鋼矢板 - 4m

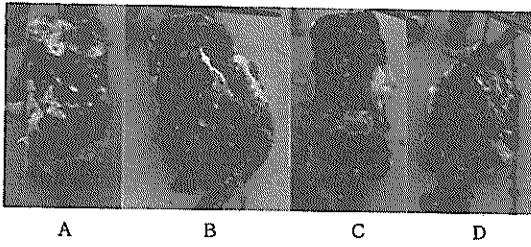


鋼矢板 + 0.4m



鋼矢板海底

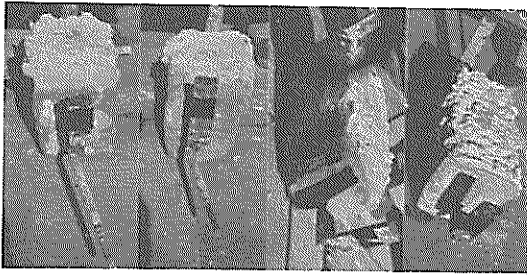
写真—5 E港における陽極および鋼矢板面



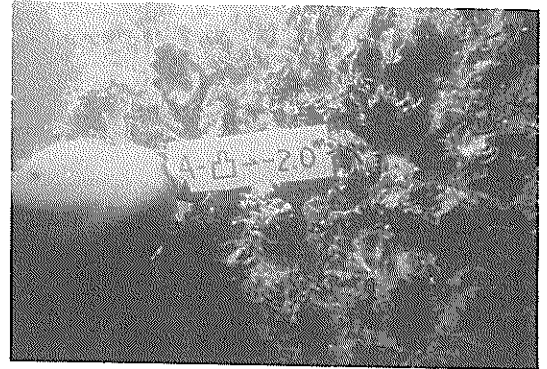
陽極（回収時）



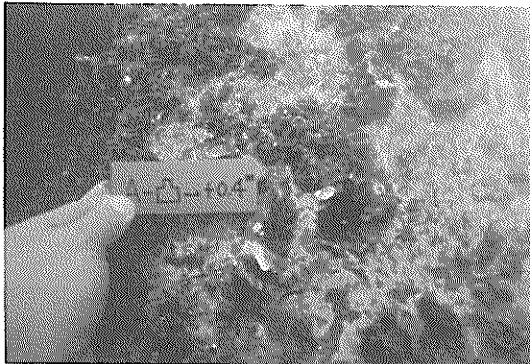
鋼矢板 ± 0 m



陽極（付着物除去後）



鋼矢板 - 2 m

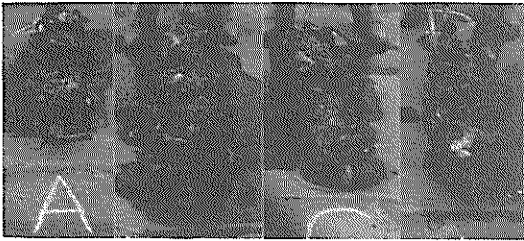


鋼矢板 + 0.4 m



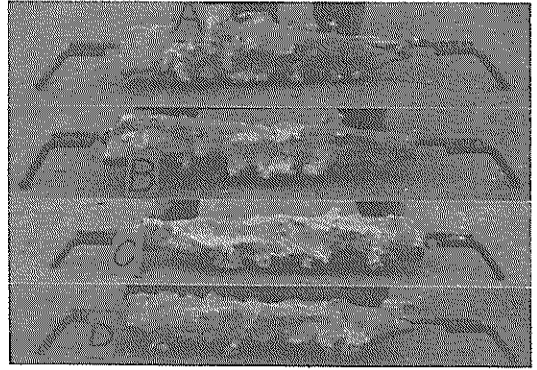
鋼矢板海底

写真—6 F港における陽極および鋼矢板面

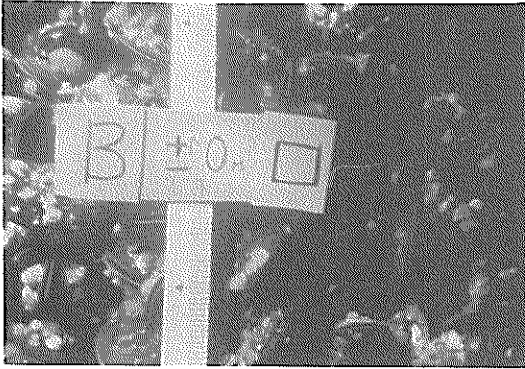


A B C D

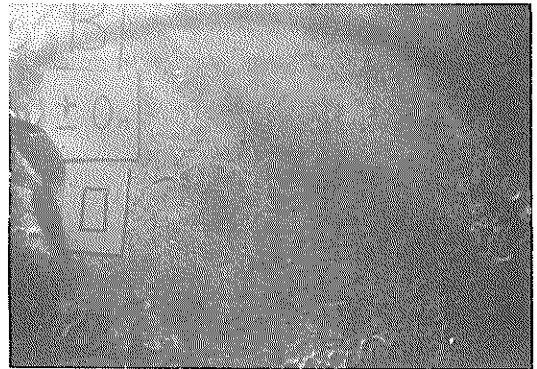
陽極（回収時）



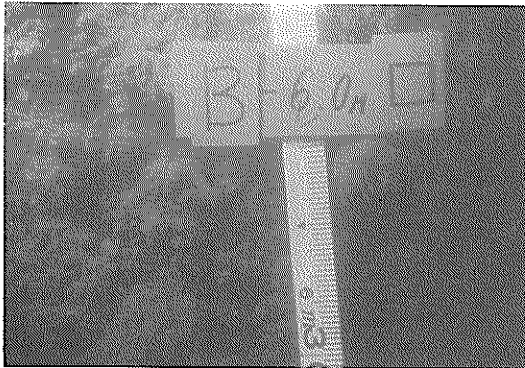
陽極（付着物除去後）
上からA, B, C, D



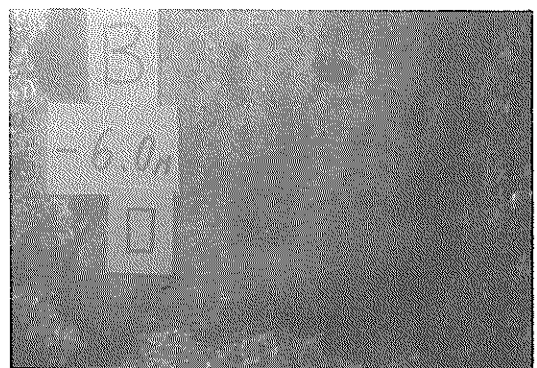
鋼管杭 ± 0 m（付着物除去前）



鋼管杭 ± 0 m（付着物除去後）

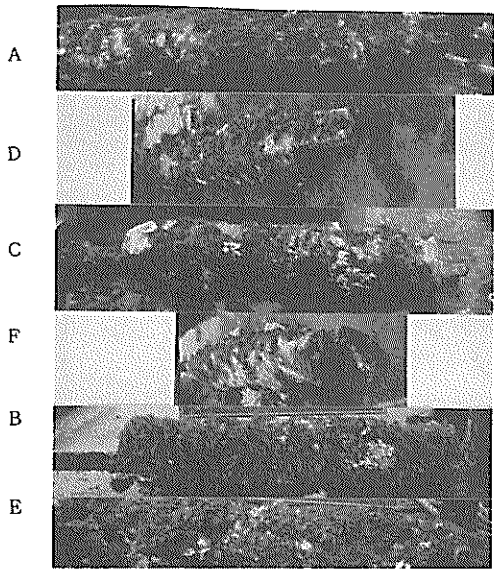


鋼管杭 - 6m（付着物除去前）

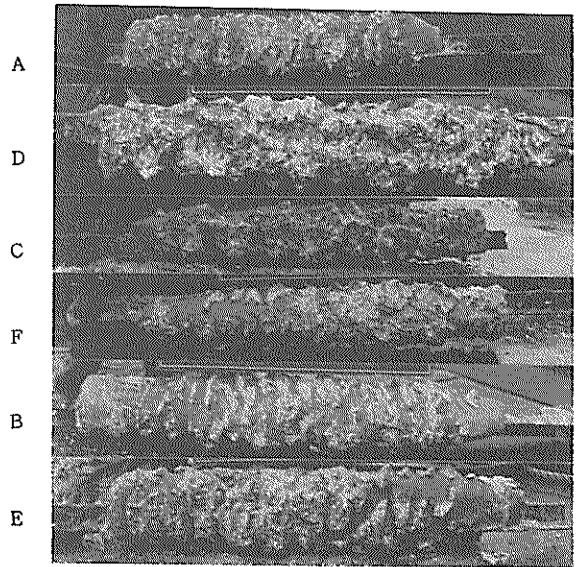


鋼管杭 - 6m（付着物除去後）

写真-7 G港における陽極および鋼管杭面



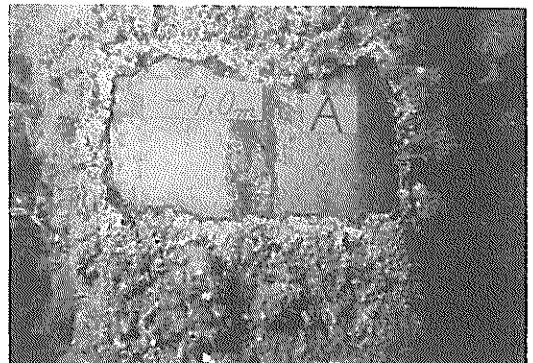
陽極（回収時）



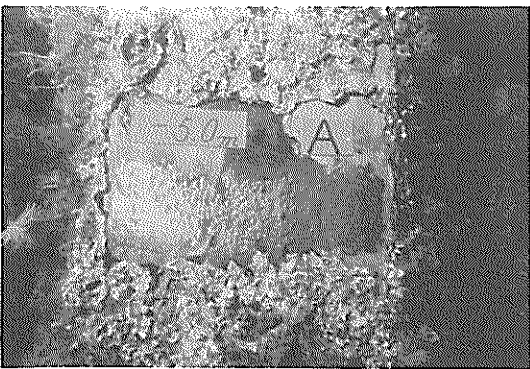
陽極（付着物除去後）



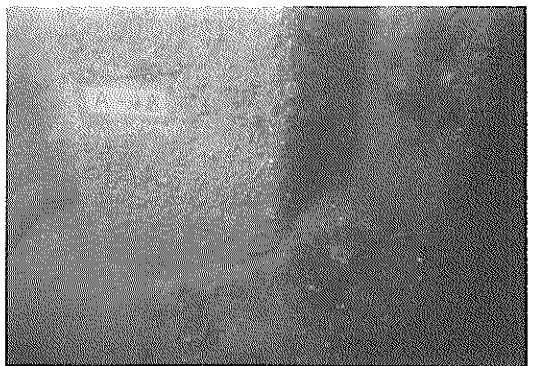
鋼矢板 - 0.5m



鋼矢板 - 9m

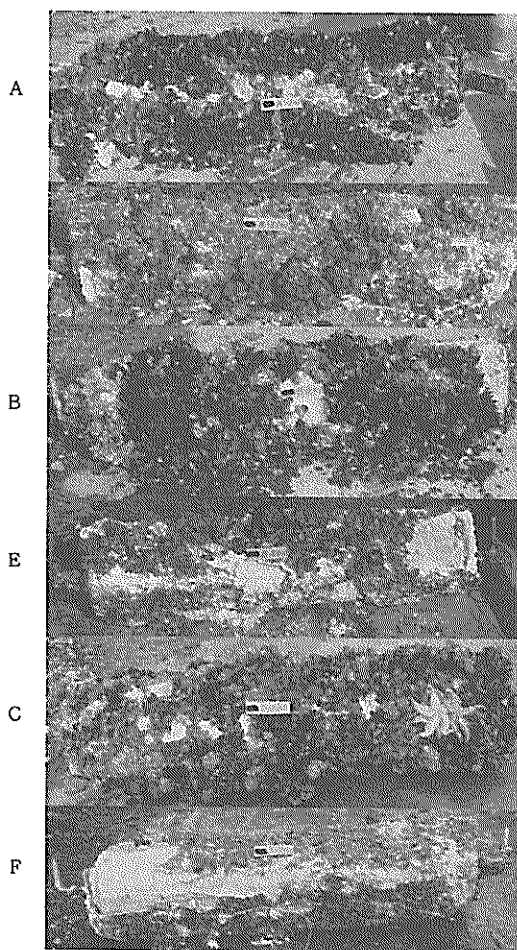


鋼矢板 - 5m

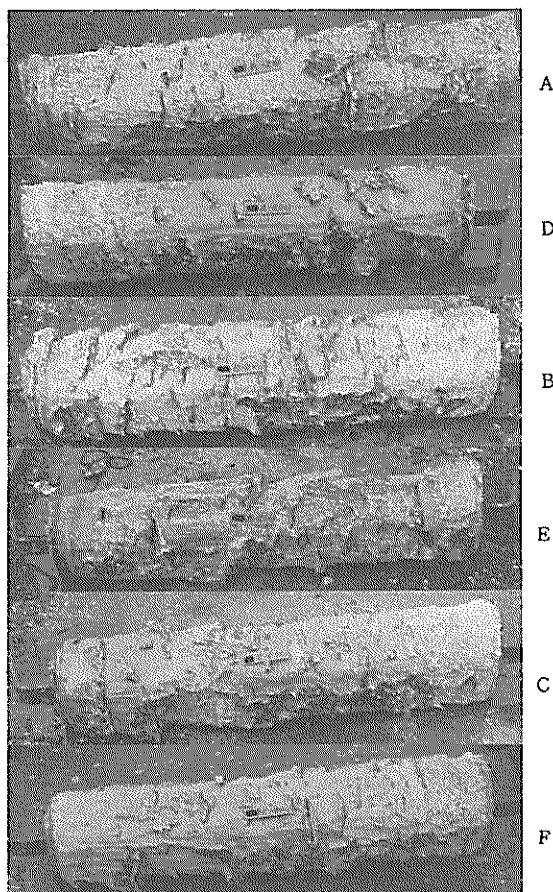


鋼矢板海底

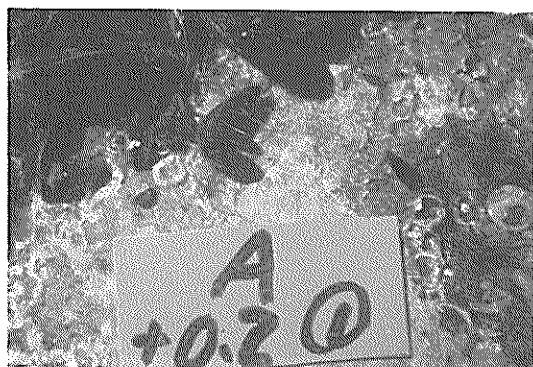
写真—8 H港における陽極および鋼矢板面



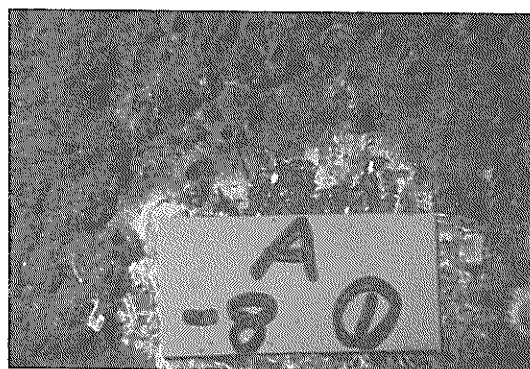
陽極（回収時）



陽極（付着物除去後）

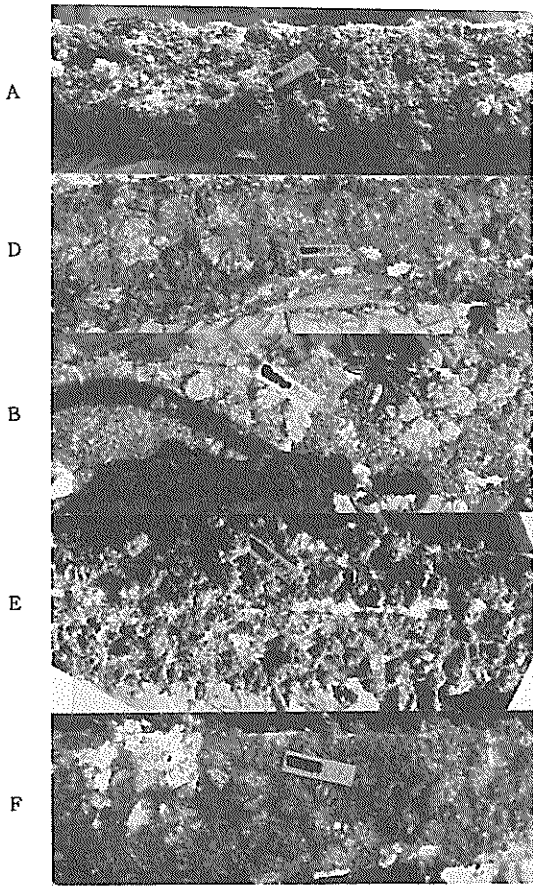


鋼管杭 +0.2m

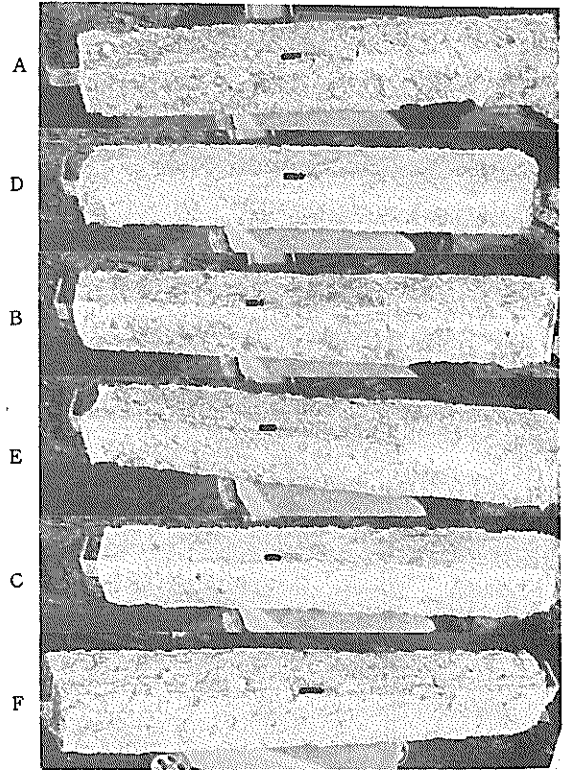


鋼管杭 -8m

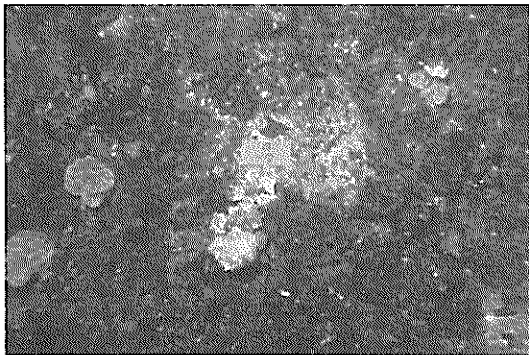
写真—9 I港における陽極および鋼管杭面



陽極（回収時）



陽極（付着物除去後）



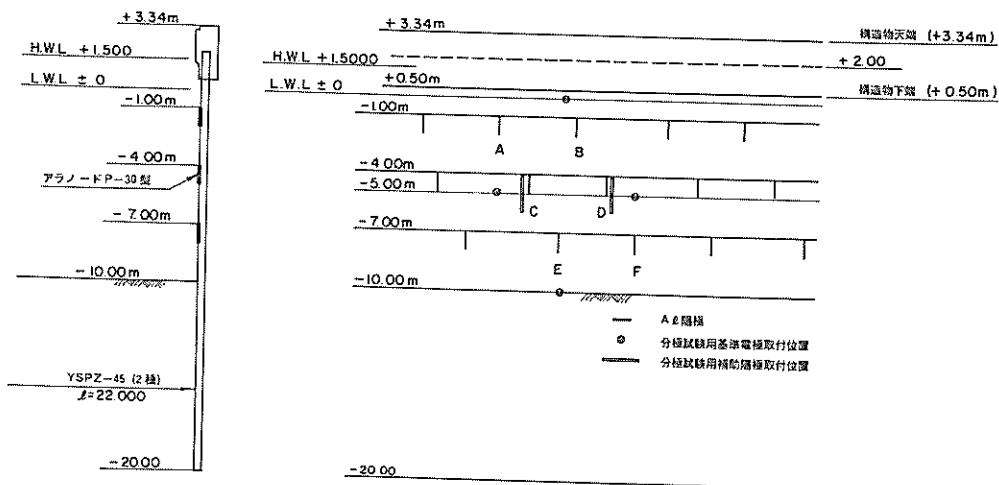
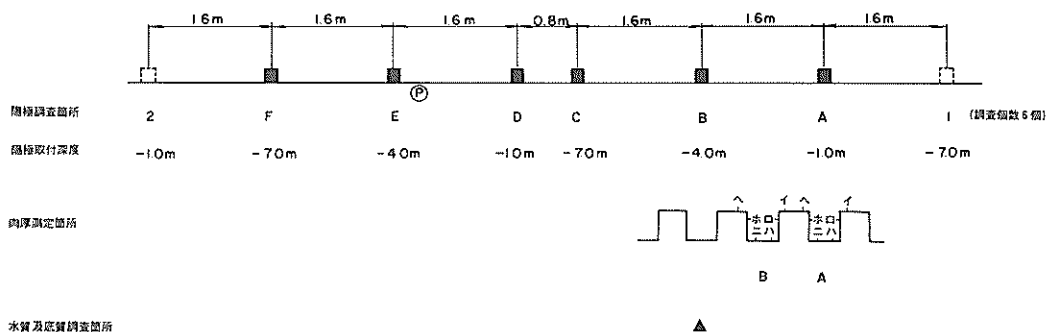
鋼板 - 7 m



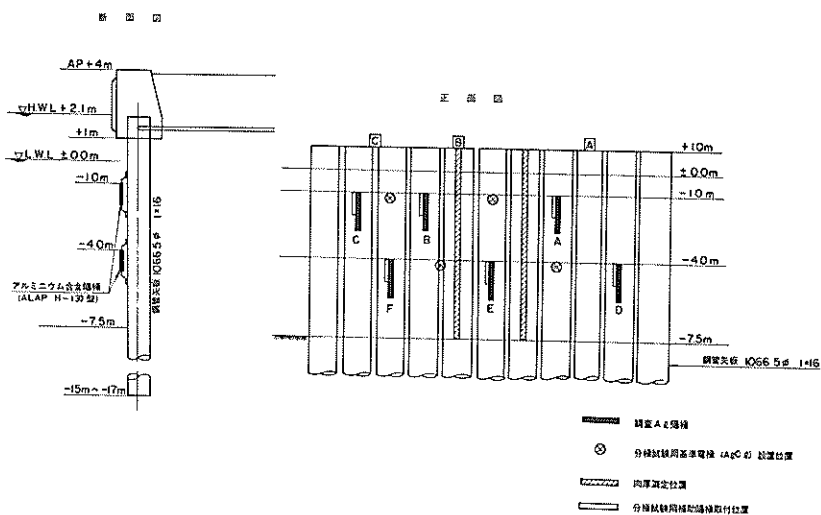
鋼板 - 7 m
（付着物除去後）

写真-10 J港における陽極および鋼板面

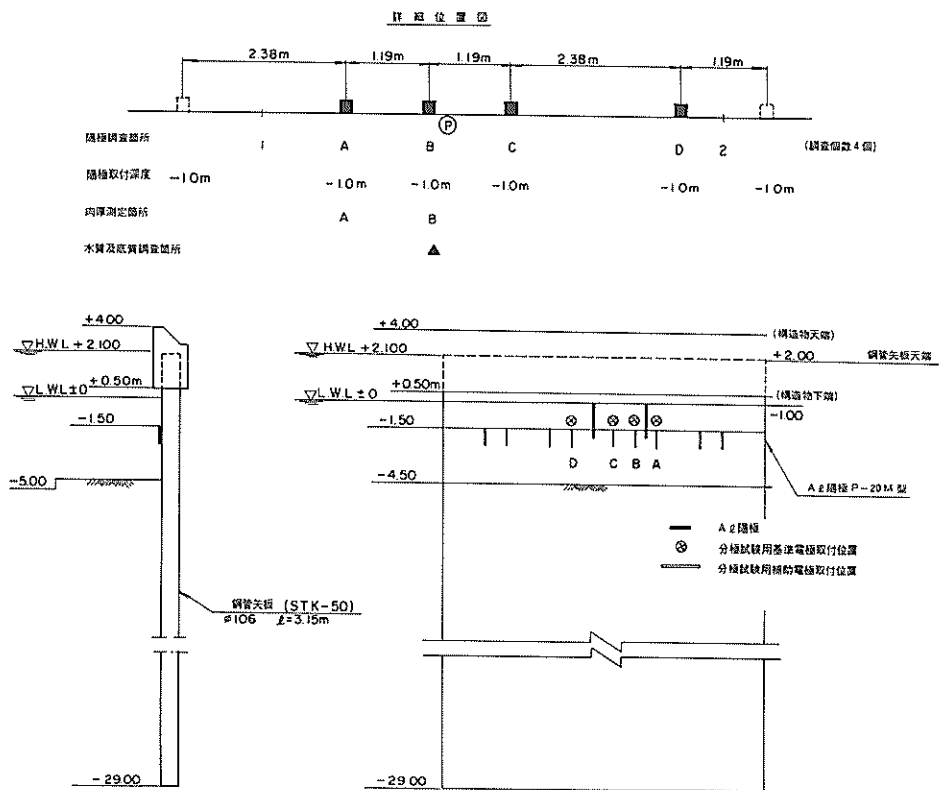
調査詳細位置図



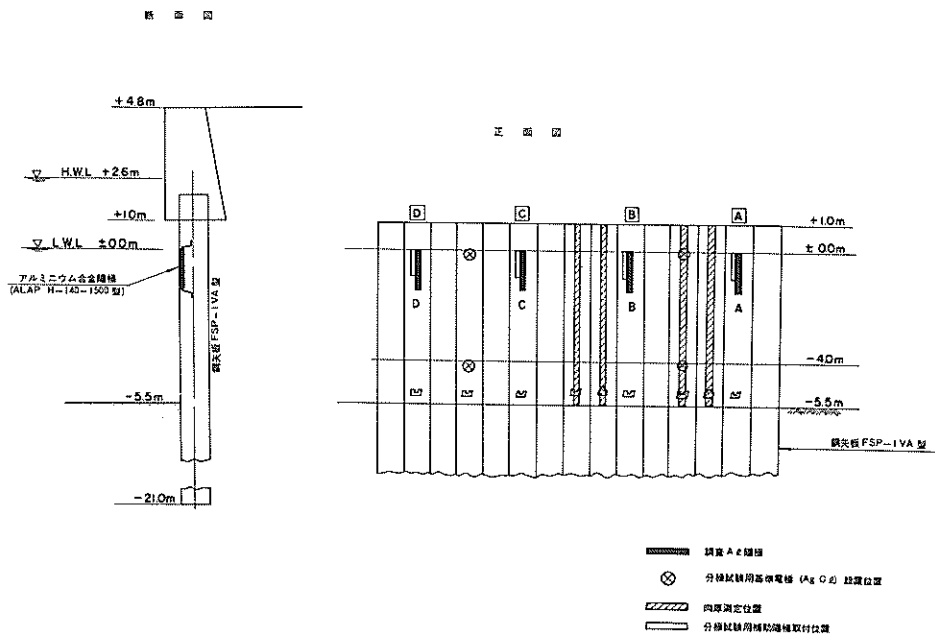
付図—1 A港における調査構造物の断面図および正面図



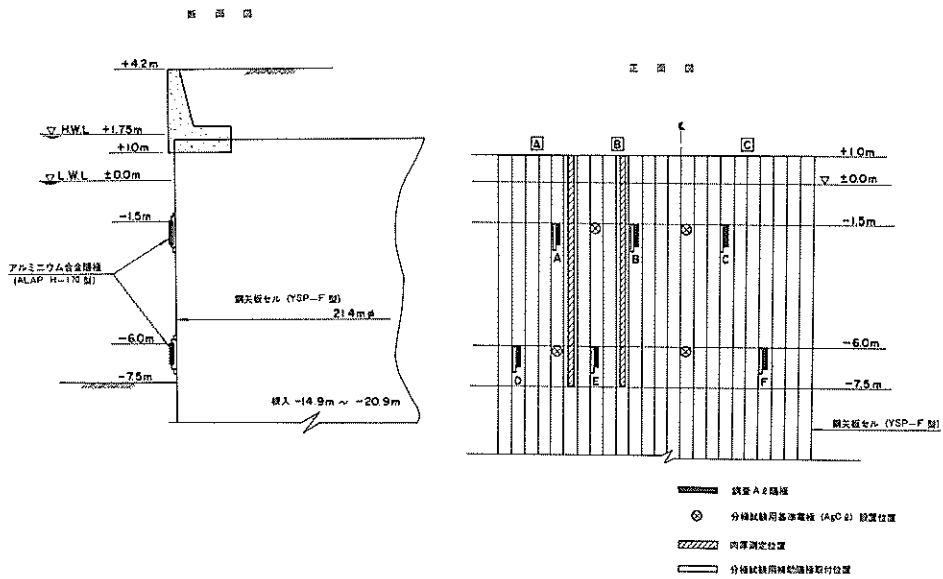
付図—2 B港における調査構造物の断面図および正面図



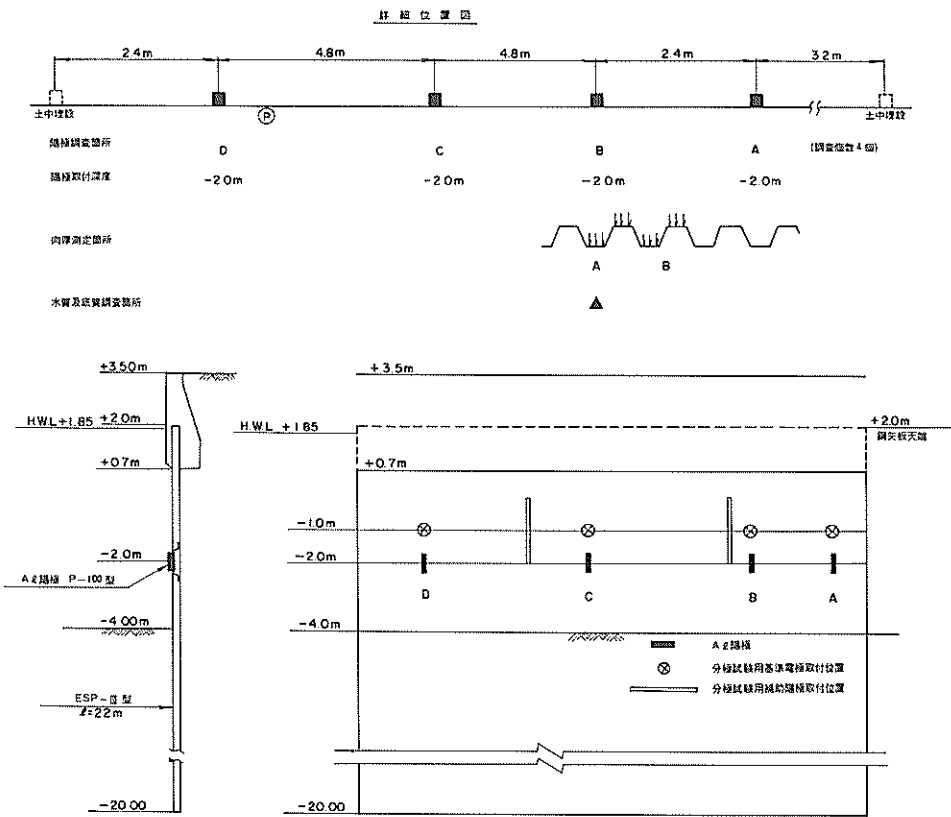
付図—3 C港における調査構造物の断面図および正面図



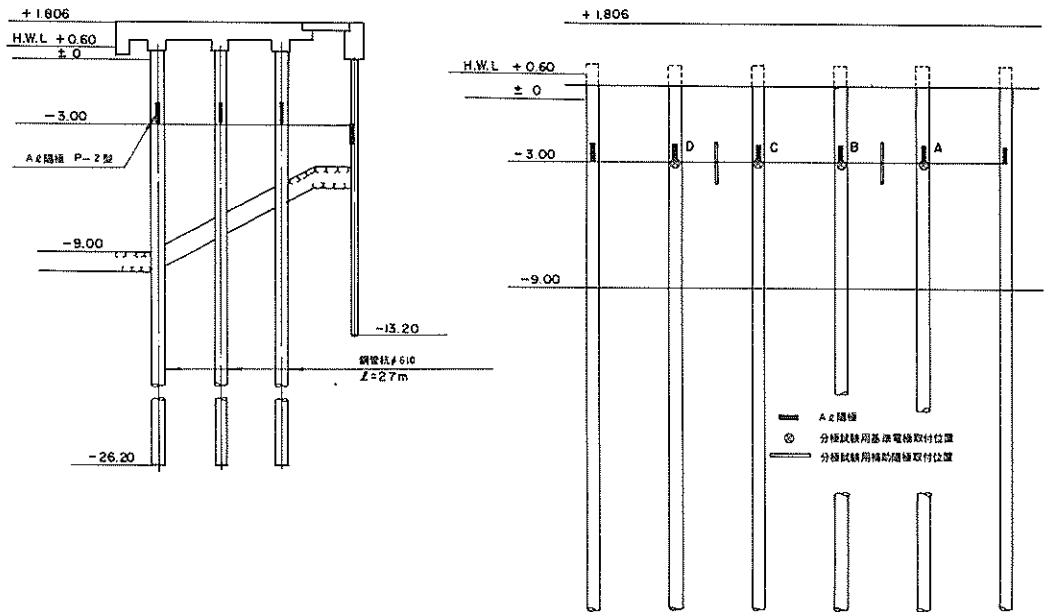
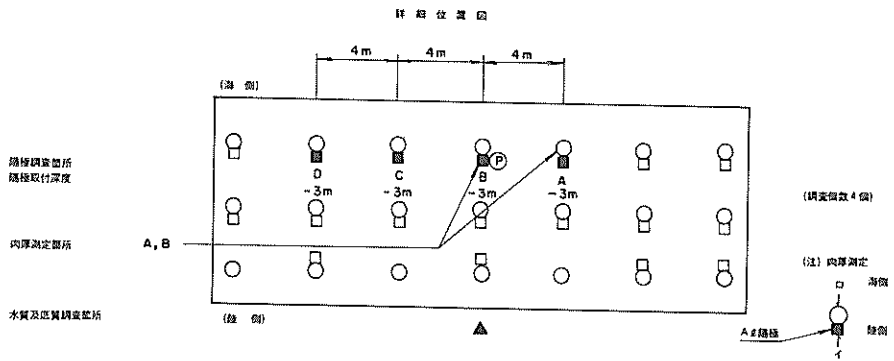
付図—4 D港における調査構造物の断面図および正面図



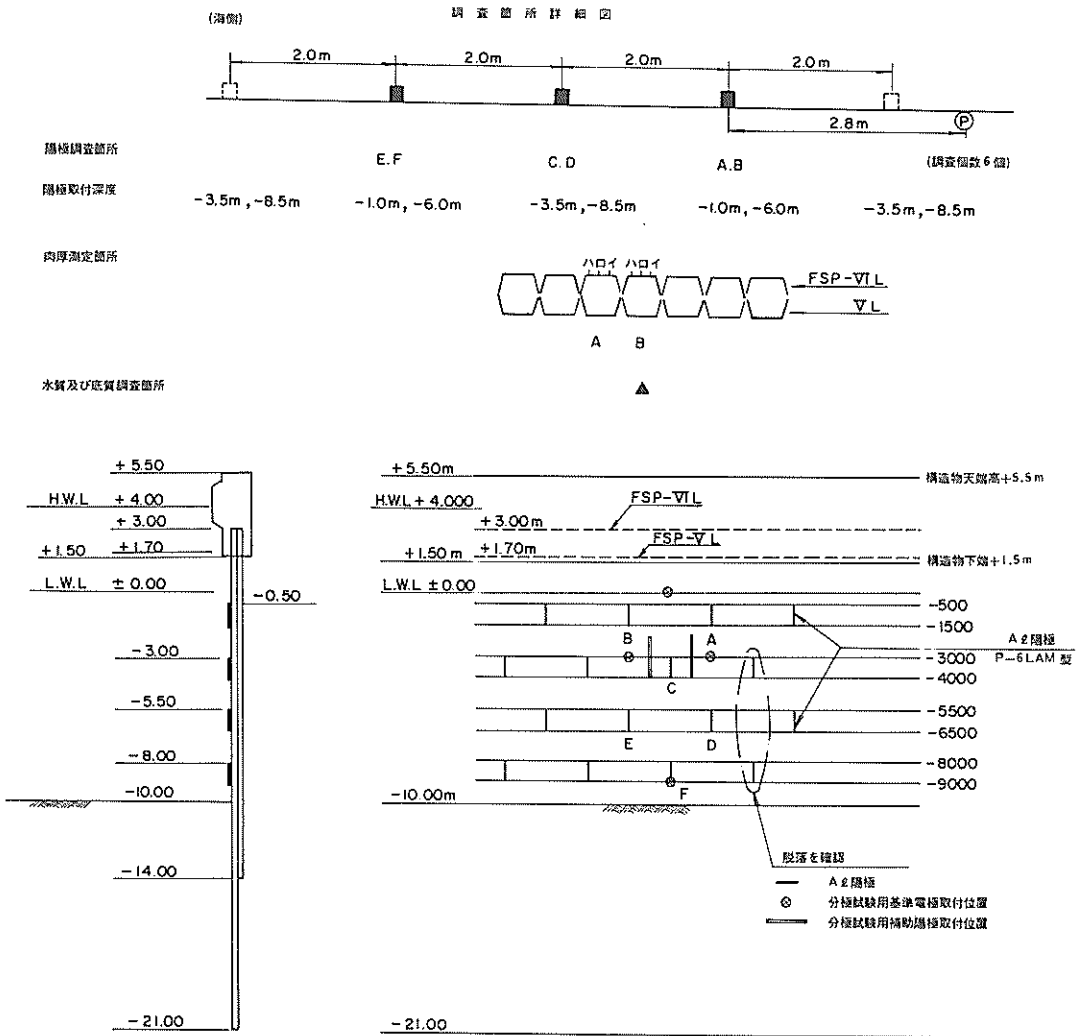
付図—5 E 港における調査構造物の断面図および正面図



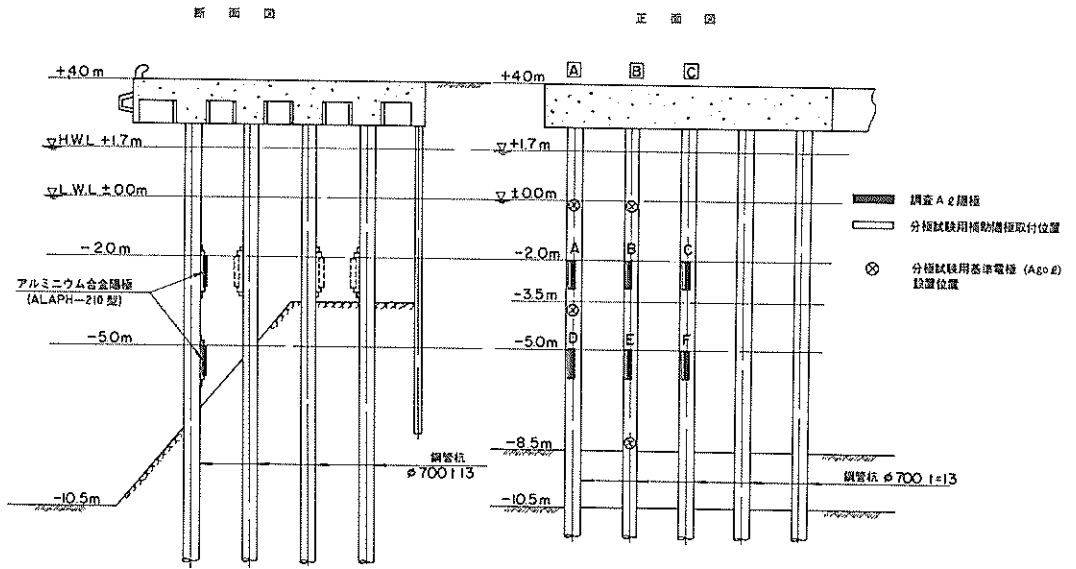
付図—6 F 港における調査構造物の断面図および正面図



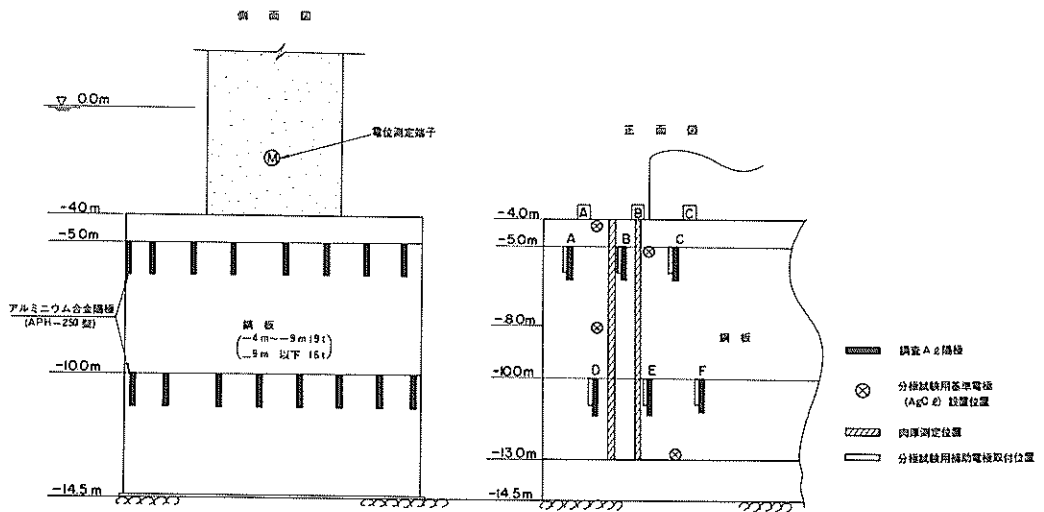
付図-7 G港における調査構造物の断面図および正面図



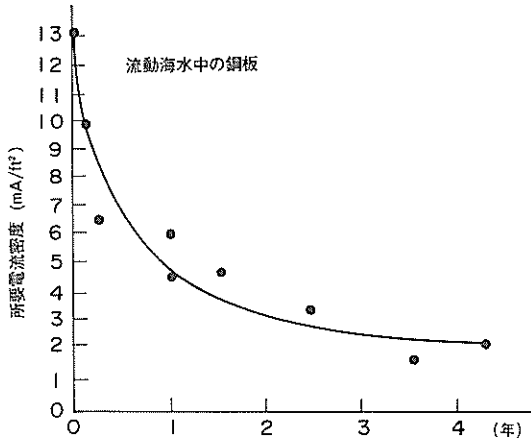
付図—8 H港における調査構造物の断面図および正面図



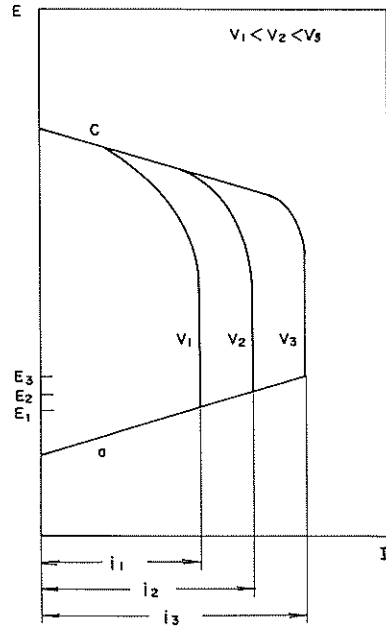
付図—9 I 港における調査構造物の断面図および正面図



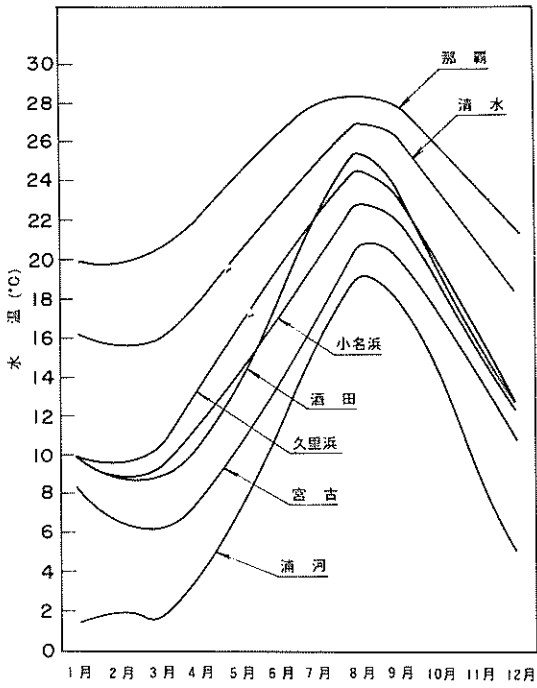
付図—10 J 港における調査構造物の断面図および正面図



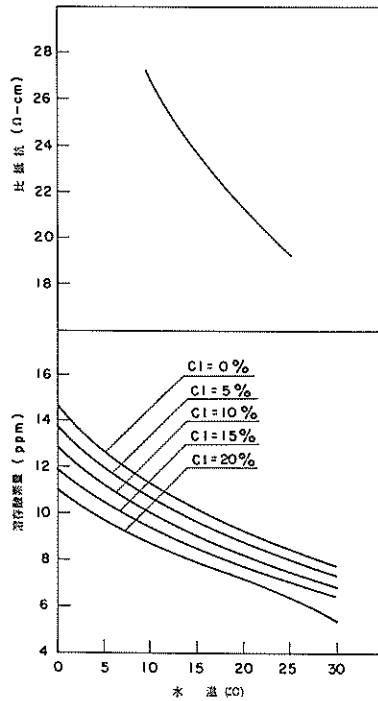
付図-11 所要防食電流の時間的変化例



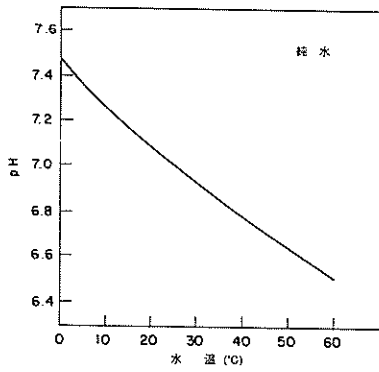
付図-12 流速の大小による腐食速度の変化



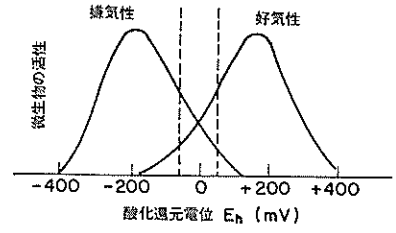
付図-13 年間水温 (久里浜1971~1977) (その他1941~1970)



付図-14 比抵抗, 溶存酸素量の水溫変化例



付図—15 pH水温変化例



付図—16 微生物の作用と酸化還元電位

付表— 1 AI 合金陽極の性能

特 性		AI-Zn-In
比 重		2.83
開路陽極電位 (V) (SCE)		1.08
鉄に対する有効電圧 (V)		0.25
発生電気量理論値 (A·hr/g)		2.87
海 水 中 1 mA / cm ²	電 流 効 率 (%)	80
	発 生 電 気 量 (A·hr / g)	2.38
	消 耗 量 (kg / A y)	3.8
地 中 0.03 mA / cm ²	電 流 効 率 (%)	65*
	発 生 電 気 量 (A·hr / g)	1.86*

* 組成により変動がある。

付表—2 水質試験結果（表層水）

試験項目	干潮 満潮	A 港	B 港	C 港	D 港	E 港	F 港	G 港	H 港	I 港	J 港	海水例* 1	海水例* 2
水温(°C)	干	9.0	21.0	20.0	22.0	22.0	14.5	13.8	13.0	16.8	17.8	23.5	26.0
	満	9.7	19.0	20.5	23.0	19.0	14.5	15.0	14.0	16.5	17.5		
pH	干	8.5	7.8	7.9	8.0	8.0	7.8	8.0	8.0	8.2	8.1	8.2	7.3
	満	8.5	7.9	7.9	8.3	7.85	7.9	7.9	8.3	8.2	8.0		
硫化還元電位 (mV)	干	+419	+182	+423	+364	+399	+437	+384	+469	+351	+360	+429	+56
	満	+499	+348	+398	+372	+330	+403	+443	+427	+366	+364		
比抵抗 (Ω-cm)	干	31.5	26.6	30.5	29.5	28.5	34.0	39.0	30.0	25.5	24.7	22.4	105
	満	31.0	27.0	31.0	27.6	27.5	36.0	32.0	32.5	25.5	23.2		
塩素イオン (ppm)	干	17,000	18,200	14,000	15,900	16,300	15,000	12,500	15,000	18,700	19,200	18,000	3,800
	満	17,000	16,700	14,000	16,200	16,500	13,500	14,500	15,500	18,700	19,300		
溶存酸素 (ppm)	干	9.1	3.0	6.4	4.4	6.8	7.2	8.2	8.6	9.8	11.0	7.5	0.3
	満	9.2	3.8	6.5	5.3	5.4	8.2	7.8	8.6	9.75	11.2		
C O D (ppm)	干	20.1	2.7	9.8	8.6	1.9	4.3	5.7	13.8	7.0	8.8	23	37
	満	6.3	5.1	15.4	3.4	3.9	3.5	5.9	13.0	3.4	8.4		
アンモニウムイオン (ppm)	干	0.43	0.16	0.52	0.17	0.55	0.01	0.02	0.28	0.08	0	~0	7.0
	満	0.07	0.44	0.10	0.13	0.42	0.07	0.02	0.22	0.08	0		
硫黄イオン (ppm)	干	0.6	0	0.5	0	0	<0.1	0.1	0.1	0	0	~0	2.0
	満	0.2	0	0.7	0	0	<0.1	<0.1	0.1	0	0		
硫酸塩還元菌 菌体数(菌数 /ml)	干	1	0	<1	0	0	<1	1	1	0	0	3	1.1×10 ⁶
	満	<1	0	10 ²	0	0	1	1	<1	0	0		
懸濁物質 (ppm)	干	1	<1	11	<1	<1	4	6	3	<1	0		
	満	2	<1	10	<1	<1	1	1	2	<1	0		
採水深度 (m)	干	+0.2	※表水 から0.5 m下り	+0.5	※表水か ら0.5m 下り	※表水か ら0.5m 下り	±0.0	-0.6	+0.3	※表水か ら0.5m 下り	※表水か ら0.5m 下り		
	満	+0.2		+1.4			+1.2	-0.3	+2.7				

※ 採水時の潮位の表水からそれぞれ0.5m下った所を採水。

※※ 腐食防食協会 8.1 分科会資料による。

付表— 3 水質試験結果 (中間水)

試験項目	干潮 満潮	A 港	B 港	C 港	D 港	E 港	F 港	G 港	H 港	I 港	J 港
水 温 (°C)	干	9.5	20.7	20.0	23.0	22.0	16.0	13.9	14.0	17.0	17.6
	満	9.7	19.0	20.5	23.0	19.0	16.0	16.0	14.0	17.2	17.0
pH	干	8.5	7.9	7.9	8.0	8.0	7.8	8.1	7.9	8.4	8.0
	満	8.5	8.0	7.8	8.2	7.9	7.8	8.0	8.3	8.2	8.0
酸化還元電位 (mV)	干	+484	+188	+423	+354	+399	+432	+375	+433	+356	+354
	満	+474	+384	+397	+366	+323	+382	+424	+447	+363	+369
比 抵 抗 (Ω-cm)	干	31.5	25.7	30.0	29.5	28.5	32.5	36.0	30.0	25.1	24.7
	満	31.0	27.0	30.0	27.6	27.0	32.0	30.0	29.5	25.5	24.7
塩 素 イ オ ン (ppm)	干	17,500	18,500	15,000	16,200	16,700	15,000	13,000	15,000	18,900	19,000
	満	17,000	16,700	15,000	16,200	16,700	15,000	16,000	16,000	18,800	19,400
溶 存 酸 素 (ppm)	干	9.2	3.2	7.2	3.0	6.2	7.0	8.2	8.3	10.4	10.8
	満	9.5	3.3	7.5	5.1	5.0	7.8	7.6	8.3	10.0	10.8
C O D (ppm)	干	20.1	7.3	9.4	5.5	3.1	3.3	3.9	13.1	2.0	1.3
	満	5.9	4.4	16.0	2.8	2.6	8.8	14.0	16.6	6.6	3.7
アンモニウムイオン (ppm)	干	0.12	0.02	0.13	0.15	0.65	0.13	0.10	0.18	0.03	0
	満	0.06	0.21	0.06	0.37	0.40	0.04	0.01	0.19	0.07	0
硫 黄 イ オ ン (ppm)	干	0.7	0	0.6	0	0	<0.1	0.2	<0.1	0	0
	満	0.5	0	0.7	0	0	<0.1	0.2	0.1	0	0
硫酸塩還元菌 菌体数(菌数/ml)	干	<1	0	<1	0	0	10	10	10	0	0
	満	<1	0	10	0	0	1	10	1	0	0
懸 濁 物 質 (ppm)	干	16	<1	10	<1	<1	17	8	3	<1	0
	満	6	<1	18	<1	<1	2	4	4	<1	0
採 水 深 度 (m)	干	-5.0	採水時の 水深の中 間	-1.0	採水時の 水深の中 間	採水時の 水深の中 間	-1.0	-4.0	-4.0	採水時の 水深の中 間	採水時の 水深の中 間
	満	-5.0		-1.0			-1.0	-4.0	-4.0		

付表-4 水質試験結果（海底水）

試験項目	干潮 満潮	A 港	B 港	C 港	D 港	E 港	F 港	G 港	H 港	I 港	J 港	海水例 1	海水例 2
水 温 (°C)	干	9.7	20.5	20.0	24.0	22.0	16.0	16.0	14.0	17.5	17.5	22.0	25.5
	満	9.6	19.0	20.5	24.0	19.5	16.0	17.0	14.0	18.0	17.0		
pH	干	8.5	7.9	7.9	8.0	8.0	7.8	8.1	7.8	8.4	8.1	8.3	7.7
	満	8.5	7.9	7.8	8.1	7.95	7.9	7.9	8.2	8.3	8.1		
酸化還元電位 (mV)	干	+534	+178	+398	+354	+405	+417	+375	+427	+363	+365	+417	+71
	満	+464	+348	+382	+350	+341	+368	+383	+421	+362	+370		
比 抵 抗 (Ω-cm)	干	31.0	24.3	30.0	27.0	28.5	32.0	32.0	29.0	24.7	24.7	22.5	29.0
	満	30.5	27.9	30.0	30.0	27.0	30.0	28.0	30.0	25.1	24.7		
塩 素 イ オ ン (ppm)	干	17,500	18,300	15,000	16,800	17,200	15,500	14,500	15,000	19,000	18,700	19,000	15,500
	満	16,500	16,900	15,000	16,800	17,200	15,000	17,500	16,000	19,000	19,900		
溶 存 酸 素 (ppm)	干	7.3	3.2	7.1	2.5	5.6	6.8	8.0	8.2	10.0	10.7	8.2	0
	満	9.5	3.3	7.2	4.9	4.8	7.4	7.2	8.2	9.5	10.8		
C O D (ppm)	干	16.0	2.4	9.2	2.2	1.9	5.3	13.7	17.7	4.7	1.2	20	25
	満	7.3	2.3	14.5	6.8	0.9	3.3	14.1	16.7	5.1	0		
アンモニウムイオン (ppm)	干	0.09	0.75	0.07	0.18	0.64	0.16	0.06	0.21	0.03	0	~0	2.0
	満	0.06	0.25	0.19	0.27	0.65	0.01	0.01	0.18	0.04	0		
硫 黄 イ オ ン (ppm)	干	0.8	0	0.6	0	0	0.1	0.2	<0.1	0	0	~0	0.8
	満	0.6	0	0.5	0	0	<0.1	0.2	<0.1	0	0		
硫酸塩還元菌 菌体量(菌数/ml)	干	<1	0	1	1.1×10 ³	0	10	1	1	0	0	7	4.5×10 ⁴
	満	<1	0	10	4.5×10 ²	0	1	10	10 ²	0	0		
懸 濁 物 質 (ppm)	干	16	<1	14	50	<1	26	14	5	<1	0		
	満	8	<1	14	5	<1	3	34	4	<1	0		
採 水 深 度 (m)	干	-9.5	海底面 から1 m上り	-2.3	海底面 から1 m上り	海底面 から1 m上り	-2.0	-7.5	-9.5	海底面 から1 m上り	海底面 から1 m上り		
	満	-9.5		-2.3			-2.0	-7.5	-9.5				

※ 腐食防食協会 8.1 分科会資料による。

港湾技研資料 No. 365

Dec. 1980

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 阿部写真印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.